

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE VIGAS MISTAS  
AÇO-CONCRETO SUBMETIDAS A INCÊNDIO**

**MATEUS DE SOUZA FURRIEL DIAS**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MAIO - 2018



# **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SUBMETIDAS A INCÊNDIO**

**MATEUS DE SOUZA FURRIEL DIAS**

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil".

Orientadora: Vânia José Karam

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MAIO - 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

55/2018

Dias, Mateus de Souza Furriel

Análise do comportamento térmico de vigas mistas aço-concreto submetidas a incêndio / Mateus de Souza Furriel Dias. – Campos dos Goytacazes, 2018. xxii, 139 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2018.

Orientador: Vânia José Karam.

Área de concentração: Estruturas.

Bibliografia: f. 125-130.

1. VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO 2. ANÁLISE TÉRMICA 3. MODELAGEM NUMÉRICA 4. INCÊNDIOS 5. PROTEÇÃO TÉRMICA I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 624.17723

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE VIGAS MISTAS  
AÇO-CONCRETO SUBMETIDAS A INCÊNDIO**

**MATEUS DE SOUZA FURRIEL DIAS**

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil".

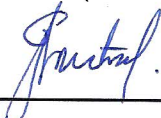
Aprovada em 28 de Maio de 2018.

Comissão Examinadora:



---

Walnório Graça Ferreira (D. Sc., Engenharia Civil) – UFES



---

Gines Arturo Santos Falcon (D. Sc., Engenharia Civil) – LECIV – UENF



---

Sergio Luis González García (D. Sc., Engenharia Civil) – LECIV – UENF



---

Vânia José Karam (D. Sc., Engenharia Civil) – LECIV – UENF  
Orientadora

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e à minha irmã.*

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de tudo agradeço a Deus, por me dar tanta sabedoria e coragem no caminho percorrido até aqui. Nos momentos mais difíceis, era Ele que me dava força para seguir em frente e concluir mais esta etapa.

Aos meus pais, Cristóvão e Valéria, que me acompanharam nessa luta por todos os dias, incentivando-me a todo momento e sempre orgulhosos a cada conquista.

À minha irmã, Júlia, por ter me mostrado os melhores caminhos, pelo apoio e que, mesmo de longe, sempre demonstrou ter preocupação com meus desafios.

À toda minha família e amigos, pelos ensinamentos de vida e exemplos a serem seguidos.

À minha orientadora, Vânia, por toda paciência e dedicação e pelos ensinamentos que me proporcionaram crescer profissionalmente.

De forma geral, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, me ajudaram a concluir este projeto final.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES .....</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xxii</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - Sistemas mistos.....	1
1.2 - Sistemas mistos em situação de incêndio .....	2
1.3 - Objetivos .....	13
1.3.1 - Objetivo geral.....	13
1.3.2 - Objetivos específicos.....	13
1.4 - Justificativa .....	14
1.5 - Estrutura da dissertação .....	15
<b>CAPÍTULO 2 – VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO.....</b>	<b>16</b>
2.1 - Introdução.....	16
2.2 - Comportamento estrutural .....	17
2.2.1 - Grau de conexão .....	17
2.2.2 - Grau de interação .....	18
2.2.3 - Largura efetiva.....	20
2.3 - Conectores de cisalhamento.....	20
2.3.1 - Ação dos conectores de cisalhamento .....	22
2.4 - Aspectos da fissuração na laje de concreto.....	24
<b>CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O INCÊNDIO E AS AÇÕES TÉRMICAS NAS ESTRUTURAS DE AÇO E CONCRETO.....</b>	<b>26</b>
3.1 - Introdução.....	26
3.2 - Fatores que influenciam a severidade de um incêndio .....	27



3.3 - Normas brasileiras para estruturas de aço em situação de incêndio.....	28
3.4 - Resistência ao fogo dos elementos estruturais.....	28
3.5 - Ações térmicas e mecanismos de transferência de calor .....	29
3.5.1 - Transferência de calor por condução .....	30
3.5.2 - Transferência de calor por convecção.....	31
3.5.3 - Transferência de calor por radiação .....	33
3.6 - Propriedades mecânicas do aço e do concreto sob temperaturas elevadas .	35
3.7 - Propriedades térmicas do aço e do concreto sob temperaturas elevadas.....	37
3.7.1 - Condutividade térmica .....	38
3.7.2 - Calor específico .....	39
3.7.3 - Alongamento .....	41
3.8 - Proteção passiva contra incêndio .....	43
3.8.1 - Proteções clássicas .....	45
3.8.2 - Argamassas projetadas .....	46
3.8.3 - Materiais pré-fabricados .....	47
3.8.4 - Tintas intumescentes .....	48
3.9 - Método simplificado de dimensionamento de vigas mistas aço-concreto.....	49
3.9.1 - Incêndio-padrão.....	50
3.9.2 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).....	52
3.9.3 - Método simplificado de análise térmica .....	53
3.9.3.1 - Fator de massividade .....	53
3.9.3.2 - Elementos estruturais sem proteção térmica.....	54
3.9.3.3 - Elementos estruturais com proteção térmica.....	56
3.9.3.4 - O caso particular da viga mista.....	57
3.10 - Métodos avançados de cálculo.....	59
3.10.1 - MEF na análise de transferência de calor .....	60
3.10.2 - O software ABAQUS .....	61

<b>CAPÍTULO 4 – ASPECTOS ADOTADOS NOS MODELOS DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO.....</b>	<b>63</b>
4.1 - Considerações iniciais .....	63
4.2 - Modelagem numérica no ABAQUS.....	69
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE TÉRMICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....</b>	<b>75</b>
5.1 - Análise do comportamento térmico genérico.....	75
5.1.1 - Campo de temperaturas da seção transversal .....	75
5.1.2 - Distribuição da temperatura em pontos específicos .....	77
5.1.3 - Condução de calor na região do conector .....	79
5.1.4 - Curvas “temperatura x tempo” .....	80
5.2 - Análise térmica comparada: ABAQUS x NBR 14323 .....	81
5.2.1 - Curvas “temperatura x tempo” das partes do perfil metálico .....	82
5.2.2 - Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto.....	88
5.2.3 - Temperatura do conector .....	92
5.2.4 - Modelos numéricos considerando as condições estabelecidas pela Norma Brasileira.....	93
5.2.5 - Variação das propriedades dos materiais aço e concreto em função da temperatura .....	98
5.3 - Análise de vigas mistas sem material de proteção térmica .....	101
5.3.1 - Influência do fator de massividade .....	101
5.3.2 - Desenvolvimento da temperatura no perfil metálico .....	103
5.3.3 - Influência das dimensões do perfil na temperatura .....	105
5.3.4 - Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto.....	107
5.4 - Análise de vigas mistas com material de proteção térmica .....	109
5.4.1 - Curvas “temperatura x tempo” das partes do perfil.....	109
5.4.2 - Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto.....	112
5.4.3 - Campo de temperaturas .....	113

5.4.4 - Temperatura do início da redução da resistência .....	115
5.4.5 - Variação das propriedades do material de proteção térmica.....	116
<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>121</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>125</b>
<b>ANEXO A - Equações básicas do MEF na transferência de calor.....</b>	<b>131</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Sistema estrutural misto (SOUZA, 2014). .....	1
Figura 1.2: Fotos dos incêndios ocorridos nos edifícios: (a) Andraus e (b) Joelma (KIMURA, 2009). .....	3
Figura 1.3: Laboratório de Cardington (KIRCHHOF, 2004). .....	11
Figura 1.4: Estrutura de oito pavimentos construída em escala real (WANG, 2002). .....	12
Figura 1.5: Vista geral de um dos pavimentos do Edifício Cardington após o incêndio (LAMONT, 2001). .....	12
Figura 1.6: Configuração deformada dos elementos estruturais após o incêndio (LAMONT, 2001). .....	13
Figura 2.1: Alguns tipos mais usuais de vigas mistas (MALITE, 1990). .....	16
Figura 2.2: Interação entre o aço e o concreto no comportamento de viga mista (MALITE, 1990). .....	19
Figura 2.3: Exemplos de tipos de conectores (ALVA, 2000). .....	21
Figura 2.4: Tipos usuais de conectores de cisalhamento (TRISTÃO, 2002). .....	21
Figura 2.5: Relação força-deslocamento nos conectores de cisalhamento (ALVA, 2000). .....	22
Figura 2.6: Transferência de forças de cisalhamento longitudinal do conector tipo pino com cabeça (OEHLERS & PARK, 1992). .....	23
Figura 2.7: Tipos de fissuração na laje devido à força concentrada aplicada pelo conector (OEHLERS, 1989). .....	24
Figura 2.8: Disposição das armaduras transversais (adicionais) na laje de concreto (TRISTÃO, 2002). .....	25
Figura 3.1: Diagramas tensão x deformação em função da temperatura: (a) aço e (b) concreto (KIRCHHOF, 2004). .....	35
Figura 3.2: Condutividade térmica do aço em função da temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013). .....	38
Figura 3.3: Condutividade térmica do concreto em função da temperatura, NBR 15200 (ABNT, 2012). .....	38
Figura 3.4: Calor específico do aço em função da temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013). .....	39
Figura 3.5: Calor específico do concreto em função da temperatura, NBR 15200 (ABNT, 2012). .....	40

Figura 3.6: Alongamento do aço em função da temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013). .....	41
Figura 3.7: Alongamento do concreto em função da temperatura, NBR 15200 (ABNT, 2012). .....	41
Figura 3.8: Revestimentos térmicos do tipo contorno e do tipo caixa para vigas mistas. .....	45
Figura 3.9: Enclausuramento em concreto da viga de aço (RIBEIRO, 2004). .....	46
Figura 3.10: Viga mista revestida por argamassa projetada (PANNONI, 2017). .....	46
Figura 3.11: Placa de gesso acartonado revestindo o perfil metálico (PANNONI, 2017) .....	48
Figura 3.12: Formação da espuma rígida nas tintas intumescentes (PANNONI, 2017) .....	49
Figura 3.13: Curvas "Temperatura x Tempo": (a) de um "Incêndio-Real" e (b) de um "Incêndio-Natural" (SILVA, 2001 apud KIRCHHOF, 2004). .....	51
Figura 3.14: Representação gráfica da curva do "Incêndio-padrão", NBR 5628 (ABNT, 2001). .....	51
Figura 3.15: Divisão do componente de aço em perfil I para distribuição de temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013). .....	58
Figura 4.1: Partes que constituem a viga mista aço-concreto. .....	64
Figura 4.2: Modelo proposto para modelagem numérica da viga mista em situação de incêndio. .....	64
Figura 4.3: Nomenclaturas das dimensões da seção transversal da viga mista. .....	65
Figura 4.4: Dimensões do conector stud bolt, em mm. .....	65
Figura 4.5: Dimensões das vigas mistas utilizadas. .....	66
Figura 4.6: Proteção térmica: (a) tipo contorno e (b) tipo caixa. .....	67
Figura 4.7: Fluxograma do procedimento de resolução da modelagem numérica no ABAQUS. .....	70
Figura 4.8: Partes dos modelos: (a) viga mista 1 (SPC), (b) viga mista 2 (CT) e (c) viga mista 2 (CX). .....	72
Figura 4.9: Elemento quadrilateral utilizado na malha. .....	73
Figura 4.10: Malha de elementos finitos da viga mista 1 (SPC). .....	73
Figura 5.1: Campos de temperaturas da viga mista 1 (SPC) nos TRRF de: (a) 30 minutos, (b) 60 minutos, (c) 90 minutos e (d) 120 minutos. .....	77

Figura 5.2: Distribuição das temperaturas (°C) na viga mista 1 (SPC) para os TRRF de 30, 60, 90 e 120 minutos. ....	78
Figura 5.3: Regiões de temperatura máxima das partes da seção transversal mista. ....	79
Figura 5.4: Condução do fluxo calor no interior da viga mista 1 (SPC). ....	79
Figura 5.5: Curvas “temperatura x tempo” da viga mista 1 (SPC), da mesa superior da viga mista 1 (SP) e do ar atmosférico. ....	80
Figura 5.6: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 5 (SP), da viga mista 6 (SP) e da viga mista 2 (SP). ....	83
Figura 5.7: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 5 (CT), da viga mista 3 (CT) e da viga mista 2 (CT). ....	85
Figura 5.8: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 5 (CX), da viga mista 4 (CX) e da viga mista 2 (CX). ....	87
Figura 5.9: Seções analisadas na laje de concreto. ....	88
Figura 5.10: Temperatura uniforme na laje de concreto com espessura de 7 cm e 10 cm da viga mista 2 (SP). ....	92
Figura 5.11: Relação temperatura do conector com a temperatura da mesa superior da viga mista 1 (SP). ....	93
Figura 5.12: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2.1 (SP). ....	94
Figura 5.13: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2.2 (SP). ....	96
Figura 5.14: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2.3 (SP). ....	97
Figura 5.15: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2 (SP-VP). ....	99

Figura 5.16: Curva “temperatura x tempo” das partes dos perfis metálicos das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 6 (SP).....	102
Figura 5.17: Desenvolvimento da temperatura nos perfis metálicos. ....	104
Figura 5.18: Dimensões, em mm, da seção transversal da viga mista 2-5 (SP). ....	105
Figura 5.19: Curvas “temperatura x tempo” dos perfis das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 2-5 (SP). ....	106
Figura 5.20: Gradiente de temperatura aos 30 minutos de incêndio das vigas mistas: (a) 2 (SP), (b) 5 (SP) e (c) 6 (SP). ....	108
Figura 5.21: Curvas “temperatura x tempo” das partes viga mista 2 com e sem proteção. ....	110
Figura 5.22: Curvas “temperatura x tempo” da viga mista 2 com e sem proteção. .	111
Figura 5.23: Campo de temperaturas da viga mista 2: (a) sem proteção térmica, (b) com proteção tipo contorno e (c) com proteção tipo caixa nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos. ....	114
Figura 5.24: Curvas “temperatura x tempo” do perfil metálico da situação de referência e das situações analisadas com proteção tipo contorno e tipo caixa. ....	118
Figura A.1: Métodos- $\alpha$ para a integração direta no tempo. ....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Fatores de redução para o aço, NBR 14323 (ABNT, 2013). .....	36
Tabela 3.2: Fator de redução para o concreto, NBR 15200 (ABNT, 2012). .....	36
Tabela 3.3: Propriedades dos principais materiais de proteção contra fogo (VILA REAL, 2003 apud REGOBELLO, 2007). .....	44
Tabela 3.4: Edificações consideradas isentas de verificação estrutural em incêndio (SILVA, 2000 apud KIRCHHOF, 2004). .....	52
Tabela 3.5: Fator de massividade para vigas mistas sem e com proteção, NBR 14323 (ABNT, 2013). .....	54
Tabela 3.6: Variação de temperatura na altura das lajes de concreto de densidade normal, NBR 14323 (ABNT, 2013). .....	59
Tabela 4.1: Perfis metálicos utilizados e suas dimensões, em mm. ....	65
Tabela 4.2: Propriedades dos materiais aço, concreto e revestimento. ....	68
Tabela 4.3: Propriedades do ar no interior da cavidade da proteção tipo caixa, (RIBEIRO, 2004). .....	68
Tabela 5.1: Espessura (mm) e temperatura (°C) das fatias da laje da viga mista 2 (SP). .....	89
Tabela 5.2: Espessura (mm) e temperatura (°C) das fatias da laje da viga mista 3 (CT). .....	89
Tabela 5.3: Espessura (mm) e temperatura (°C) das fatias da laje da viga mista 4 (CX). .....	90
Tabela 5.4: Temperatura uniforme nas seções da laje (e = 10 cm) de concreto das vigas mistas 2(SP), 3 (CT) e 4 (CX). .....	90
Tabela 5.5: Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto e temperaturas máxima e mínima da viga mista 2 (SP). .....	91
Tabela 5.6: Condições analisadas das vigas mistas. ....	93
Tabela 5.7: Temperatura da seção 1 da laje da viga mista 2 (SP) e 2.1 (SP). .....	98
Tabela 5.8: Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto das vigas mistas 2 (SP) e 2 (SP-VP). .....	100
Tabela 5.9: Fator de massividade das partes e dos perfis das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 6 (SP). .....	101
Tabela 5.10: Fator de massividade das partes e dos perfis das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 2-5 (SP). .....	105



Tabela 5.11: Temperatura uniforme nas seções das lajes de concreto das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 6 (SP). .....	107
Tabela 5.12: Temperatura uniforme na seção 1 da laje de concreto da viga mista 2 com e sem proteção. ....	112
Tabela 5.13: Tempo em que as partes do perfil atingem a temperatura de 400 °C. ....	116
Tabela 5.14: Valores das propriedades do material de proteção das situações analisadas. ....	117
Tabela 5.15: Valores das temperaturas do perfil metálico com proteção tipo contorno da situação de referência e das situações analisadas nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos. ....	118
Tabela 5.16: Valores das temperaturas do perfil metálico com proteção tipo caixa da situação de referência e das situações analisadas nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos. ....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

- Letras romanas maiúsculas

$A$  - Área da seção transversal;

$A_a$  - Área do perfil aço;

$A_{af}$  - Área da mesa superior do perfil de aço;

$A_{aw}$  - Área da alma do perfil de aço;

$A_c$  - Área de concreto;

$E$  - Módulo de elasticidade do aço;

$E_c$  - Módulo de elasticidade do concreto;

$E_\theta$  - Módulo de elasticidade dos aços laminados a uma temperatura  $\theta_a$ ;

$F_{hd}$  - Resistência da conexão de cisalhamento mínima;

$F_{sh}$  - Força de cisalhamento;

$I_{ef}$  - Momento de inércia efetivo;

$M_{Rd}$  - Momento fletor resistente de cálculo;

$M_{sd}$  - Momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{sh}$  - Momento gerado pela força de cisalhamento;

$P_c$  - Força axial no concreto;

$P_s$  - Força axial no aço;

$Q$  - Quantidade de calor;

$Q_{rd}$  - Resistência da conexão de cisalhamento dos conectores;

$T$  - Temperatura dos gases no ambiente em chamas;

$T_0$  - Temperatura dos gases no instante  $t = 0$ ;

- Letras romanas minúsculas

$b$  - Largura efetiva da laje de concreto;

$b_{fi}$  - Largura da mesa inferior do perfil;

$b_{fs}$  - Largura da mesa superior do perfil;

$c_a$  - Calor específico do aço;

$c_{cn}$  - Calor específico do concreto de densidade normal;

$c_m$  - Calor específico do material de proteção contra incêndio;

$d$  - Altura total do perfil de aço;

$e_j$  - Espessura das  $n$  fatias da laje;

$f_c$  - resistência do concreto à compressão;

$f_{cd}$  - resistência de cálculo do concreto à compressão;

$f_{ck}$  - Resistência característica do concreto à compressão;

$f_u$  - Resistência última;

$f_{y,\theta}$  - Resistência ao escoamento dos aços a uma temperatura  $\theta_a$ ;

$f_y$  - resistência ao escoamento do aço;

$f_{yd}$  - Resistência de cálculo ao escoamento do aço;

$h$  - Altura da alma do perfil de aço;

$h_a$  - Altura efetiva do conector;

$h_{ef}$  - Altura efetivada laje;

$h_F$  - Espessura da pré-laje pré-moldada de concreto ou a altura das nervuras da laje com fôrma de aço incorporada;

$h_w$  - Altura da alma do perfil de aço;

$k_{c,\theta}$  - Fator de redução da resistência característica do concreto à compressão em temperatura elevada;

$k_{E,\theta}$  - Fator de redução para o módulo de elasticidade do aço em temperatura elevada;

$k_{y,\theta}$  - Fator de redução da resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada;

$k_{sh}$  - fator de correção para o efeito de sombreamento;

$l_a$  é o comprimento da peça de aço a 20°C;

$l_C$  é o comprimento da peça de aço a 20°C;

$n$  - Número de fatias em que a laje foi dividida;

$q_{ii,Rd}$  - Força resistente de um conector de cisalhamento;

$t$  - Tempo;

$t_c$  - Altura da laje de concreto;

$t_{fi}$  - Espessura da mesa inferior do perfil;

$t_{fs}$  - Espessura da mesa superior do perfil;

$t_m$  - Espessura do material de proteção contra incêndio;

$t_w$  - Espessura da alma do perfil de aço;

$u$  - Perímetro do elemento estrutural de aço exposto ao incêndio;

$u_m$  - Perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio;

$u/A$  - Fator de massividade;

$z$  - Excentricidade.

- Letras gregas

$\Delta l_a$  - Alongamento da peça de aço provocada pela temperatura;

$\Delta l$  - Alongamento do elemento concreto de densidade normal provocado pela temperatura;

$\Delta l_a/l_a$  - Alongamento do aço;

$\Delta t$  - Intervalo de tempo;

$\Delta \theta_{a,t}$  - Elevação de temperatura de um elemento estrutural de aço;

$\alpha_c$  - Coeficiente de transferência de calor por convecção;

$\gamma_{cs}$  - Coeficiente de ponderação da resistência;

$\gamma_c$  - Coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

$\gamma_{a1}$  - Coeficiente de ponderação da resistência do aço;

$\gamma_{gi}$  - Coeficiente de ponderação para as ações permanentes diretas;

$\varepsilon_{res}$  - Emissividade resultante;

$\varepsilon_r$  é a emissividade da superfície receptora;

$\eta$  - Grau da conexão;

$\theta_a$  - Temperatura na superfície do aço exposto ao fogo;

$\theta_{a,t}$  - Temperatura do aço no tempo  $t$ ;  
 $\theta_c$  - Temperatura do concreto;  
 $\theta_{c,j}$  - Temperatura das  $n$  fatias da laje;  
 $\theta_f$  - temperatura média do fluido;  
 $\lambda$  – constante de proporcionalidade;  
 $\lambda_a$  - Condutividade térmica do aço;  
 $\lambda_{cn}$  - Condutividade térmica do concreto de densidade normal;  
 $\lambda_m$  - Condutividade térmica do material de proteção contra incêndio;  
 $\rho$  - Massa específica;  
 $\rho_a$  - Massa específica do aço;  
 $\rho_m$  - Massa específica do material de proteção contra incêndio;  
 $\sigma$  - constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann;  
 $\phi$  - Diâmetro;  
 $\varphi$  - valor do fluxo de calor por unidade de área;  
 $\varphi_c$  - Componente do fluxo de calor devido à convecção;  
 $\varphi_r$  - Componente do fluxo de calor devido à radiação.

- Siglas

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials;

ABCEN - Associação Brasileira dos Construtores de Estruturas Metálicas;

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AISC - American Institute of Steel Construction;

ASTM - American Society for Testing and Materials;

CT: Viga mista aço-concreto com proteção térmica tipo contorno e sem presença do conector *stud bolt*;

CX: Viga mista aço-concreto com proteção térmica tipo caixa e sem presença do conector *stud bolt*;

MEF - Métodos dos Elementos Finitos;

NBR - Norma Brasileira;

SP: Viga mista aço-concreto sem proteção térmica e sem presença do conector *stud bolt*;

SPC: Viga mista aço-concreto sem proteção térmica e com presença do conector *stud bolt*;

TRRF - Tempo requerido de resistência ao fogo.

- Unidades

°C - Graus Celsius;

A - Ampere;

J - Joules;

k - Quilo;

m - Metro;

mm - Milímetro;

N - Newton;

W - Watts.

## RESUMO

Os sistemas estruturais mistos têm sido bastante utilizados na construção civil, tanto no contexto mundial como no Brasil. Pode-se destacar a utilização do elemento estrutural viga mista aço-concreto, que consiste na associação de vigas de aço com lajes de concreto. As vigas mistas aço-concreto, assim como qualquer elemento estrutural, quando expostas aos gases quentes do incêndio, perdem resistência e rigidez devido à degeneração das propriedades físicas de seus materiais constituintes. O incêndio constitui um risco considerável às propriedades e à segurança humana e, dessa forma, a proteção térmica é uma solução incorporadora ao sistema construtivo de uma edificação. Diante disso, a temperatura atingida por um elemento estrutural durante o incêndio é objeto da análise térmica. Esta dissertação teve como objetivo realizar a análise térmica de vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio com e sem material de proteção térmica dos tipos contorno e caixa. A seção mista estudada é composta por perfis metálicos do tipo I, conector de cisalhamento *stud bolt* e laje de concreto. Para a realização dessa análise, foram elaborados modelos numéricos bidimensionais no software ABAQUS ® Versão 6.14, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). Como resultados, obtém-se conclusões sobre o desenvolvimento e comportamento térmico da seção transversal mista, a eficiência do material e do tipo de proteção passiva e como o índice de aumento de temperatura do perfil do aço é proporcional ao seu fator de massividade. Além disso, os resultados obtidos pela modelagem numérica foram comparados com valores obtidos através do método simplificado de cálculo prescrito na norma NBR 14323 (ABNT, 2013). Essa comparação mostrou que, para certo tipo de proteção e tempo de duração de incêndio, as temperaturas previstas pela Norma Brasileira podem diferir substancialmente daquelas obtidas pela simulação numérica.

**Palavras-chave:** vigas mistas aço-concreto, análise térmica, modelagem numérica, incêndio, proteção térmica.

## ABSTRACT

Composite structural systems have been widely used in civil construction, both in Brazil and worldwide. It is possible to highlight the use of the steel-concrete composite structural element, which consists of the association of steel beams with concrete slabs. Steel-concrete composite beams, as well as any structural elements when exposed to hot gases from the fire, lose strength and rigidity due to the degeneration of the physical properties of their constituent materials. The fire is a considerable risk to properties and human safety and therefore thermal protection is a solution that should be incorporated into the construction project of a building. Under these circumstances, the temperature reached by a structural element during the fire is the target of thermal analysis. This dissertation had the purpose of performing the thermal analysis of steel-concrete composite beams in a fire situation with and without thermal protection material of contour and box types. The composite section is made up of metallic profiles of type I, stud bolt shear connector and concrete slab. To perform this analysis, two-dimensional numerical models were developed in ABAQUS ® Software Version 6.14, which uses the Finite Element Method (FEM). As a result, one can obtain conclusions about the development and thermal behavior of the composite cross-section, the material efficiency and the passive protection and how the index of the steel temperature increase is proportional to its massivity factor. In addition, the results obtained by numerical modeling were compared with values obtained using the simplified calculation method set by NBR 14323 (ABNT, 2013) standard. This comparison showed that for a certain type of protection and duration of fire, the temperatures predicted by the Brazilian Standard may differ substantially from those obtained by the numerical simulation.

**Keywords:** steel-concrete composite beams, thermal analysis, numerical modeling, fire, thermal protection.



## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 - Sistemas mistos

O desenvolvimento dos diversos sistemas estruturais e construtivos, tanto no contexto mundial como no Brasil, fez surgir os sistemas formados por elementos mistos de aço e concreto, sendo que a combinação desses materiais visa aproveitar ao máximo as vantagens de cada um deles. Esses sistemas estruturais mistos trazem algumas vantagens, como economia de material e facilidade de execução, sendo intensamente utilizados em edifícios multiandares no exterior e estão evoluindo no Brasil. Podem ser citados como exemplos os pilares mistos aço-concreto (pilares de aço protegidos ou preenchidos com concreto), as lajes mistas aço-concreto (lajes de concreto com fôrma de aço incorporada), as ligações mistas e as vigas mistas.

As vigas mistas aço-concreto surgiram como consequência da utilização de vigas de aço sob lajes de concreto. O tipo de interação entre esses dois elementos é de grande importância para avaliação do comportamento estrutural da viga mista, isto é, parte da eficiência desse elemento estrutural está diretamente relacionada ao trabalho em conjunto desses dois materiais. Para garantir essa interação desejada, utilizam-se elementos metálicos conhecidos como conectores de cisalhamento. Esses conectores podem ser de diversos tipos, tais como pino com cabeça, perfis laminados, perfis formados a frio, barras redondas, etc. Na Figura 1.1, é possível observar um sistema estrutural misto (viga mista e laje mista com fôrma de aço incorporada).



Figura 1.1: Sistema estrutural misto (SOUZA, 2014).

É importante salientar que as vigas mistas, assim como qualquer elemento estrutural de uma construção, quando são expostas a altas temperaturas, durante condições típicas de um incêndio, podem ter a resistência mecânica e a rigidez reduzidas, a ponto de levar toda ou parte da construção ao colapso. Neste sentido, a verificação de estruturas de aço em situação de incêndio se tornou uma etapa importante na execução de projetos, sendo desenvolvidas proteções do tipo passivas ou ativas, que têm como objetivo principal a contenção do incêndio, possibilitando, de forma segura, a desocupação dos ambientes que compõem uma dada edificação de interesse.

As primeiras pesquisas a respeito das vigas mistas aço-concreto foram realizadas por meio de modelos experimentais. Atualmente, com o avanço dos microcomputadores, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior frequência. Dentre as ferramentas existentes para análise numérica, destacam-se pacotes comerciais desenvolvidos com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), os quais possibilitam reproduzir numericamente o comportamento de uma estrutura, evitando os custos inerentes à realização de ensaios.

## **1.2 - Sistemas mistos em situação de incêndio**

As primeiras edificações que utilizaram vigas mistas ocorreram na década de 1840. Em MALITE (1990), é mencionado que os estudos referentes aos sistemas mistos aço-concreto tiveram seu início em 1914, na Inglaterra, quando a empresa *Redpath Brow and Company* iniciou uma série de ensaios a respeito de sistemas compostos para pisos. Entre 1922 e 1939, foram construídos edifícios e pontes que adotavam o sistema de vigas mistas. A partir do ano 1944, os sistemas mistos passaram a fazer parte das normas da AASHO (*American Association of State Highway Officials*), hoje denominada por AASHTO. No Brasil, a primeira normatização para elementos mistos data de 1986 e foi publicada pela ABNT. Trata-se da norma NBR 8800 (ABNT, 1986), que abordava o dimensionamento apenas de vigas mistas. Atualmente, a versão NBR 8800, publicada em 2008, contempla elementos mistos como: lajes, pilares, vigas e ligações mistas e traz procedimentos de dimensionamento e verificação bastante similares aos encontrados na norma europeia Eurocode 4 Part 1-2 (2005) e na norma americana AISC-LRFD (2005), destacando que a primeira delas é a única que aborda, exclusivamente, os elementos mistos de aço e concreto.

A preocupação com a segurança de estruturas em situação de incêndio já existe há bastante tempo em muitos países da Europa e nos Estados Unidos. Porém, apesar de o fogo ser um assunto de extrema importância e estar sempre presente em nossas vidas, a preocupação em projetar estruturas resistentes à ação de um incêndio é recente no contexto brasileiro. Os primeiros trabalhos sobre elementos de aço em altas temperaturas surgiram a partir do final da década de 1960, após o acontecimento de eventos dessa natureza, que resultaram em grandes perdas.

Devido ao seu grande poder destrutivo, até hoje são lembradas grandes perdas humanas e materiais decorrentes de incêndios catastróficos. A Figura 1.2 ilustra algumas dessas tragédias ocorridas em edifícios no Brasil.

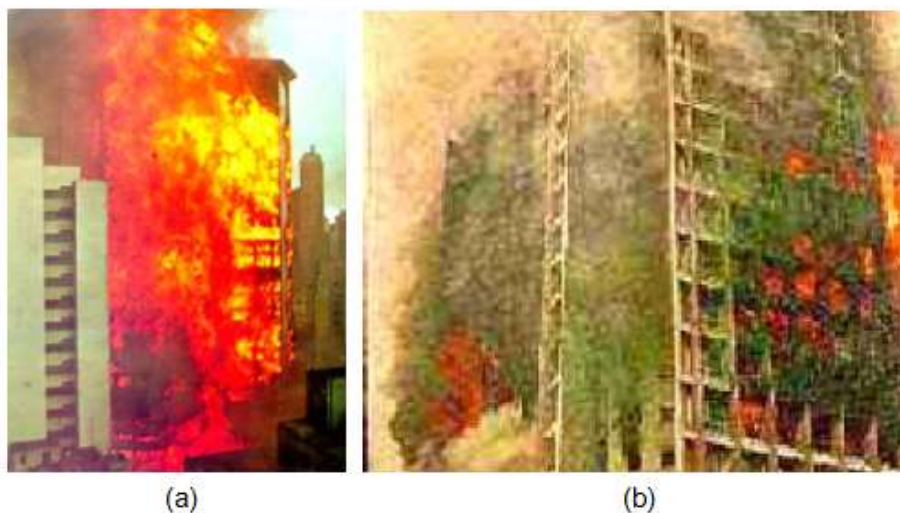


Figura 1.2: Fotos dos incêndios ocorridos nos edifícios: (a) Andraus e (b) Joelma (KIMURA, 2009).

É citado em REGOBELLO (2007) que, até a década de 1970, quando foram registrados os acidentes no Edifício Andraus, em 1972, no Edifício da Caixa Econômica do Rio de Janeiro, em 1974, e no Edifício Joelma, também em 1974, não havia nenhum tipo de regulamentação de segurança contra incêndio, fato esse que dificultava significativamente o trabalho dos bombeiros. No caso do incêndio do Edifício Andraus, foram registradas 16 mortes e, segundo KIMURA (2009), foi constatado que não havia nenhum tipo de sistema de segurança, tais como chuveiros automáticos, sinalização de saídas de emergência e alarmes de detecção automática, dificultando a desocupação do edifício. O incêndio no Edifício Joelma destruiu quatorze dos seus vinte e cinco andares, além de seis pavimentos de subsolo. Nesse caso, a escada central de formato triangular localizada no centro dos pavimentos e a impossibilidade de pouso do helicóptero, devido ao telhado ser formado por placas de

amianto, dificultaram ainda mais o processo de desocupação e, dessa forma, o incidente resultou em mais de 180 vítimas.

As construções metálicas em aço não são tão facilmente destruídas pelo fogo; entretanto, um dos pontos mais importantes nos projetos de construção civil é reduzir o risco de incêndio e, caso este ocorra, aumentar o tempo de início de deformação da estrutura, conferindo, assim, maior segurança a estas construções. Por isso, as legislações para construção civil de vários países estabelecem exigências mínimas de resistência ao fogo para os componentes estruturais. Estas normas de segurança contra incêndios, em geral, levam em consideração uma temperatura crítica na qual o aço perde uma proporção significativa de sua resistência mecânica ou atinge um estado limite de deformações ou de tensões, ou seja, uma temperatura que represente uma condição de falha, que pode representar o colapso da estrutura. Usualmente, refere-se também a um tempo de resistência ao fogo, ou seja, ao tempo para que a temperatura crítica ou condição de falha seja alcançada.

O estabelecimento das primeiras normas para testes de resistência ao fogo deve-se a ASTM - *American Society for Testing and Materials* que, em 1911, estabeleceu a norma "*Standard tests for fireproof constructions*". Em 1932, a *British Standard Institution* publicou a norma BS 476, intitulada "*Fire tests on buildings materials and structures*", a qual, com as devidas revisões e ampliações, ainda hoje é bastante utilizada.

No Brasil, após os incidentes anteriormente citados, atenções especiais foram direcionadas a este assunto e impulsionaram a criação de um decreto sobre proteção contra incêndio e, a partir daí, outras regulamentações foram criadas, sendo basicamente adaptações de legislações estrangeiras. Em 1980, foi publicada a norma "NBR 5627 - Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo", que em 2001 foi cancelada por apresentar prescrições que inviabilizavam economicamente a execução de obras de concreto (REGOBELLO, 2007). Em 1993, foi criado o decreto 38069 no Estado de São Paulo, que estabelecia especificações para proteção contra incêndio. Também no Estado de São Paulo, em 1994, o Corpo de Bombeiros publicou a Instrução Técnica IT-CB-0233/94, que determinava o tempo de resistência ao fogo para vários tipos de estruturas de aço. Em 1995, a ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, que é o Fórum Nacional de Normalização, num trabalho conjunto com a ABCEM - Associação Brasileira dos Construtores de Estruturas Metálicas, criou um grupo de trabalho que

tinha o objetivo de elaborar textos-base de normas que se aplicassem à segurança contra incêndio das estruturas. Como resultado, encontram-se atualmente aprovadas e publicadas as normas técnicas NBR 14323 (ABNT, 2013) e NBR 14432 (ABNT, 2001), que serão comentadas ainda nesta dissertação.

Em relação a pesquisas relacionadas a estruturas em situação de incêndio, os ensaios em fornos, apesar de mais simples, ainda são caros e demandam tempo (WANG, 2002), razão pela qual em muitas ocasiões são construídos modelos numéricos, pois, uma vez validados, é possível obter vários tipos de informações, tais como campos térmicos, deslocamentos e tensões. Para a construção do modelo numérico são utilizados, geralmente, pacotes computacionais específicos para estruturas em situação de incêndio, citando-se o ADAPTIC, o SAFIR e o VULCAN. Há também pacotes computacionais mais gerais baseados no método dos elementos finitos, tais como ANSYS, ABAQUS e DIANA, que também permitem a análise de fluxo de calor para a obtenção de campos térmicos, possibilitando também a análise acoplada termoestrutural. Diante disso, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas e publicadas para a análise do comportamento das estruturas de aço e mistas em situação de incêndio, com base em resposta numérica ou experimental. Apresenta-se, a seguir, uma descrição de alguns desses estudos publicados na literatura científica, tanto no contexto mundial como no Brasil.

JAIN & RAO (1983) conceberam o primeiro programa de elementos finitos para análise de pórticos planos sob altas temperaturas que incorporava a não linearidade geométrica, considerando a mudança nas propriedades do material devido ao aumento da temperatura, efeito de fluência e grandes deformações. Com base nesse estudo, pode ser previsto o período de tempo durante o qual a estrutura pode desempenhar sua função sem falha local ou global.

Já BABA & NAGURA (1985) também incluíram, em suas análises via método dos elementos finitos, a não linearidade física do material sob altas temperaturas, que se mostrou ser indispensável ao estudo. Para avaliar o efeito de propriedades de materiais dependentes do tempo sobre o comportamento estrutural do aço, foi realizado um estudo usando as funções experimentais das propriedades do material obtidas pelos ensaios de tração e de fluência a alta temperatura.

OLAWALE (1988) desenvolveu um método para análise de colunas perfeitamente isoladas em incêndio baseado na teoria das pequenas deformações, considerando tensões residuais, cargas excêntricas e flambagem local.

No começo da década de 1990, BURGESS *et al.* (1990) elaboraram um procedimento numérico que analisava seções transversais de vigas metálicas, considerando que as propriedades térmicas e mecânicas do aço variavam com a não linearidade da temperatura ao longo da seção transversal.

Em LIE (1994), foi apresentado um modelo matemático para calcular as temperaturas, as deformações e a resistência ao fogo dos pilares de seção circular mista preenchida com concreto armado.

POH & BENNETTS (1995a; 1995b) desenvolveram um método numérico para analisar o comportamento mecânico de elementos estruturais como vigas e colunas sob altas temperaturas. Esse método considera as cargas nominais, o grau de restrição dos apoios, a variação da temperatura ao longo da seção transversal e comprimento, não linearidades físicas e geométricas e permite o uso de qualquer tipo de seção transversal.

SAKUMOTO *et al.* (1992), SAKUMOTO & SAITO (1995), SAKUMOTO *et al.* (1996) e SAKUMOTO (1999) avaliaram o comportamento mecânico de pilares e vigas constituídos de aço resistente ao fogo, definidos conforme a composição química e o processo de fabricação. Verificaram que os aços resistentes ao fogo, analisados experimental e numericamente, forneciam melhor desempenho estrutural sob incêndio quando comparados com o aço estrutural convencional.

Em SILVA (1997), foi proposto um método simplificado de dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio, levando em consideração a influência da não linearidade dos materiais, bem como os efeitos da não linearidade geométrica. Foram tratados os principais parâmetros que influenciam o processo de desenvolvimento de incêndios reais, tais como grau de ventilação do compartimento em chamas, carga de incêndio e configuração geométrica do ambiente em chamas.

WANG (1998) apresentou resultados experimentais e numéricos propondo um novo modelo que tinha a finalidade de reduzir o custo da proteção térmica em vigas mistas. As vigas mistas eram protegidas parcialmente, possuindo proteção térmica apenas na mesa inferior e o equivalente a um quarto da alma do perfil metálico. A eficiência desse tipo de sistema foi avaliada, comparando sua resistência última à flexão com aquela obtida para a situação em que se tinha a viga totalmente protegida. Os resultados obtidos indicaram que os custos do material para ambos os casos, proteção total ou parcial, são similares, mas o custo de instalação pode ser reduzido em mais de 50% para o caso de vigas mistas com proteção parcial.

Em HUANG *et al.* (1999), foi apresentado um procedimento não linear tridimensional para a modelagem da conexão de cisalhamento parcial em vigas mistas simplesmente apoiadas, tanto em temperatura ambiente como em situação de incêndio. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais descritos em CHAPMAN & BALAKHRISNAN (1964), para as vigas em temperatura ambiente, e com os resultados descritos em WAINMAN & KIRBY (1988), para as vigas em situação de incêndio.

CALMON *et al.* (2000) desenvolveram um programa para análise térmica de estruturas em situação de incêndio, baseado no método dos elementos finitos. O modelo é capaz de prever o comportamento térmico das estruturas maciças tanto na fase de construção, como na fase de utilização, quando submetidas à ação térmica ambiental.

Em SANAD *et al.* (2000), foi apresentado um modelo numérico para analisar o comportamento de vigas mistas de edifícios em situação de incêndio, em concordância com os testes executados em Cardington. Os resultados obtidos indicaram que a expansão térmica tem forte influência na resposta da estrutura durante a exposição do compartimento ao incêndio.

Foi apresentado, em MÄKELAINEN & MA (2000), um modelo numérico que representa pisos mistos, em que a viga de aço se encontra parcialmente embutida na laje de concreto, com vistas a estudar seu comportamento estrutural e térmico. Os resultados obtidos demonstraram que o colapso estrutural foi causado pela redução da capacidade à flexão da viga quando exposta ao incêndio.

Em CAZELI *et al.* (2001), foram realizadas análises numéricas de vigas de aço em seção "I", em situação de incêndio, sujeitas ao fenômeno de flambagem lateral, tendo por base os resultados obtidos do programa SAFIR. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados analíticos obtidos pelo método simplificado de dimensionamento proposto pelo Eurocode 3 Parte 1-2.

SPÍNDOLA & FAKURY (2002) concluíram que, no dimensionamento de pisos de edifícios em situação de incêndio, quando se considera o trabalho conjunto de vigas e laje, permite-se que as vigas secundárias possam ficar sem proteção. Tal fato se deve a habilidade da laje mista de suportar as ações das vigas secundárias que falham no incêndio e transferi-las para as vigas principais ainda resistentes da estrutura do piso.

Em SILVA (2002), foi desenvolvido um modelo computacional para a análise térmica bidimensional de estruturas metálicas e mistas, com vistas a avaliar sua resposta numérica quando submetidas a elevadas temperaturas. Por meio de estudos teóricos realizados e a consequente implementação computacional, foram analisadas diferentes seções de aço, de concreto e seções mistas e os resultados obtidos foram comparados com resultados numéricos e experimentais obtidos por outros pesquisadores.

WONG & GHOJEL (2003) analisaram as formulações de transferência de calor em relação aos membros de aço protegidos termicamente e verificaram que, para certos tipos de materiais isolantes, as temperaturas calculadas através do Eurocode diferiam substancialmente daquelas calculadas por meio de soluções exatas analíticas.

Em MENDES (2004), foi realizado um estudo teórico sobre perfis de aço formados a frio submetidos a elevadas temperaturas, além de serem apresentados tipos de revestimentos térmicos e suas aplicações. Desse modo, foi proposto um método para o dimensionamento de perfis formados a frio por meio da norma NBR 14762 (ABNT, 2001) com adaptações para situação de incêndio e de proteções térmicas desses perfis.

PITANGA (2004) estudou o comportamento térmico de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio no ANSYS e também o comportamento estrutural dessas vigas mistas com proteção térmica com auxílio do MATHCAD.

Foi desenvolvido, por RIBEIRO (2004), um algoritmo computacional para execução de análise térmica transiente e não-linear de elementos estruturais de aço, de concreto e mistos, com e sem proteção térmica. Foram criados modelos bidimensionais e tridimensionais, com base no MEF, e os resultados associados a valores obtidos por procedimentos de normas.

Em REGOBELLO (2007), foi estudado, em caráter numérico e utilizando o ANSYS, a elevação de temperatura ao longo do tempo em seções transversais de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto, confrontando os resultados numéricos com os obtidos por meio do método simplificado apresentado pela norma NBR 14323 (ABNT, 1999), e também, em caráter complementar, de madeira, em situação de incêndio.

Já em SANTOS (2009), foram desenvolvidos modelos numéricos para pilares mistos curtos de seção tubular circular de aço, preenchidos com concreto e



submetidos a elevadas temperaturas, a fim de avaliar a baixa taxa de aquecimento dos pilares devido à baixa condutividade térmica do concreto. A modelagem, utilizando o ANSYS, teve como objetivo simular o comportamento estrutural desses elementos para avaliar a influência da elevação da temperatura na resistência e indicar para qual tempo e em que níveis de temperatura o acréscimo de resistência devido ao efeito de confinamento deixa de ser pronunciado.

Em KIMURA (2009), foi analisado numericamente o comportamento de pilares metálicos em situação de incêndio. Os resultados obtidos com modelos numéricos desenvolvidos no ANSYS foram comparados com valores normativos, e foi observada uma não conformidade em alguns casos de interesse, apresentando diferenças significativas nos campos térmicos e no comportamento estrutural como um todo.

Destaca-se o trabalho apresentado em DORR (2010), no qual também são analisados pilares em situação de incêndio, mas com enfoque nas restrições axiais e seus efeitos após o aumento de temperatura, bem como as consequentes expansões do material. Para analisar a influência dessas restrições, foi realizada uma análise paramétrica, com o modelo devidamente validado, contemplando casos de restrição completa, parcial e extremidade livre.

CAVALCANTI (2010) investigou o efeito da armadura na capacidade resistente de vigas mistas parcialmente revestidas submetidas a elevadas temperaturas. Além da simulação numérica no programa DIANA, foi realizada uma investigação experimental com ensaios de vigas sob flexão em quatro pontos.

Foi proposto em WANG (2012) um tipo inovador de arranjos não uniformes de materiais de proteção contra incêndios que fosse eficaz contra incêndios em vigas mistas semicontínuas. A proteção contra incêndio é utilizada de acordo com os momentos de flexão e as forças de cisalhamento. Diferentes modos de ruptura são identificados a partir dos resultados de análises de elementos finitos sob diferentes combinações de perfis e, dessa forma, foi apresentada então uma abordagem de projeto simples para prever as capacidades de carga das vigas mistas semicontínuas para cada um dos modos de ruptura identificados.

Em RODRIGUES (2013), foi feito um estudo numérico e analítico sobre o comportamento de vigas mistas em incêndio, analisando o fenômeno do incêndio, seus tipos de modelos, a degradação das propriedades do aço com o aumento da temperatura, isolamento térmico de estruturas e os mecanismos de transmissão de

calor. Além disso, foi determinada a carga crítica na viga levando-se em conta a instabilidade lateral com flexo-torção.

SANTOS (2014) avaliou o comportamento térmico, estrutural e termoestrutural acoplado de lajes mistas através de modelos numéricos em elementos finitos no programa DIANA. Foi feita uma análise térmica bidimensional, avaliando os principais parâmetros que influenciam na distribuição da temperatura na laje.

FISCHER & VARMA (2015) desenvolveram modelos 3D de elementos finitos para prever o comportamento e a ruptura de vigas mistas com ligações simples sujeitas a cargas gravitacionais e condições de incêndio, que incluem tanto as fases de aquecimento quanto as de resfriamento.

Em ROCHA E SILVA (2016), foi estudado o desempenho de vigas em situação de incêndio a partir do modelo de fibras, onde foi apresentada a análise numérica de vigas de concreto armado de seção retangular e T e de vigas mistas de aço-concreto. Os resultados numéricos, os quais se referem às relações momentos x curvatura para diferentes temperaturas e valores máximos atingidos para os momentos fletores, foram comparados com as respostas de expressões analíticas definidas por normas brasileiras e foi possível identificar a resistência residual da estrutura à medida que o tempo de exposição ao fogo aumenta e também demonstrar a redução efetiva de sua rigidez.

Foi estudado, em MELÃO (2016), o dimensionamento de vigas e pilares de aço em situação de incêndio. Foi desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de calcular os esforços resistentes e temperaturas dos perfis de aço em temperatura ambiente e em incêndio, segundo Normas Brasileiras. Além disso, foram criadas ferramentas não computacionais para a determinação das temperaturas críticas destes elementos estruturais.

Ainda nesse contexto, é importante salientar que atenções têm sido direcionadas para o desenvolvimento de procedimentos em estruturas completas em escala real, com base em ensaios mais realísticos, visando à investigação do comportamento da estrutura dos edifícios como um todo durante as condições de incêndio. Na Alemanha, em 1985, foram realizados testes de resistência ao fogo em um edifício modelo de quatro pavimentos, construído na Universidade de Stuttgart-Vaihingen. Foram usados, na estrutura, diversos tipos de elementos mistos aço-concreto, como por exemplo, pilares de aço preenchidos com concreto, vigas mistas e pisos mistos.

Um dos mais recentes estudos desenvolvidos com esse propósito foi realizado entre os anos de 1995 e 1996, no BRE (*Building Research Establishment*), em Cardington, na Inglaterra, em que foram executados ensaios em edificações de madeira, de concreto e mista de aço e concreto, com ênfase em incêndio. Uma estrutura mista de aço e concreto foi construída em escala real com 8 pavimentos, no interior de um hangar, com a finalidade de investigar o desempenho das estruturas sob o efeito de um incêndio real, bem como fornecer informações experimentais qualitativas para a validação dos vários modelos numéricos publicados por outros autores. A intensidade do incêndio foi controlada limitando a quantidade de material combustível e o concreto da laje foi considerado como um elemento contribuinte no isolamento do ambiente em chamas. Os pilares metálicos foram densamente protegidos para evitar instabilidade global na estrutura e limitar o dano causado pelo incêndio e, por isso, os resultados não foram suficientes para quantificar o comportamento desses elementos no estado limite de incêndio. A expansão térmica da viga acarretou um aumento do momento fletor no pilar. Porém, em temperaturas mais altas, conforme o pilar fosse se deslocando, o momento fletor adicional se reduziu a um nível insignificante devido à viga aquecida mudar sua trajetória de deslocamento (KIMURA, 2009).

As Figuras 1.3 e 1.4 ilustram, respectivamente, o Laboratório Cardington, utilizado para a execução dos ensaios em estruturas em escala real submetidas a temperaturas elevadas, e o sistema estrutural, o qual foi citado anteriormente, submetido ao incêndio.



Figura 1.3: Laboratório de Cardington (KIRCHHOF, 2004).



Figura 1.4: Estrutura de oito pavimentos construída em escala real (WANG, 2002).

Já as Figuras 1.5 e 1.6 ilustram a configuração deformada dos elementos estruturais do edifício após o incêndio.



Figura 1.5: Vista geral de um dos pavimentos do Edifício Cardington após o incêndio (LAMONT, 2001).



Figura 1.6: Configuração deformada dos elementos estruturais após o incêndio (LAMONT, 2001).

### 1.3 - Objetivos

Os objetivos desta dissertação se dividem em objetivo geral e objetivos específicos.

#### 1.3.1 - Objetivo geral

Esta dissertação teve como objetivo realizar a análise térmica de vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio, constituídas por laje de concreto com face inferior plana, perfis metálicos do tipo I e conector de cisalhamento *stud bolt*, com e sem a presença de proteção térmica. A análise foi realizada através da elaboração de modelos numéricos bidimensionais através do programa comercial ABAQUS ® Versão 6.14 (SIMULIA, 2014), desenvolvido com base no Método dos Elementos Finitos, e por meio do método simplificado de cálculo proposto pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013).

#### 1.3.2 - Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Desenvolvimento dos modelos numéricos das vigas mistas submetidas a altas temperaturas no ABAQUS;
- Análise do comportamento térmico genérico da seção transversal da viga mista sem proteção térmica;

- Comparação da elevação da temperatura das partes da viga mista ao longo do tempo, com e sem proteção térmica, obtida pela análise numérica com a elevação da temperatura obtida pelo método de cálculo simplificado;
- Análise da influência do fator de massividade e das dimensões de cada parte da viga metálica na taxa de crescimento da temperatura no aço e no concreto;
- Identificação da eficiência dos tipos de proteção térmica no perfil de aço e na laje de concreto;
- Análise do efeito da variação das propriedades do material de revestimento na temperatura do perfil de aço.

#### **1.4 - Justificativa**

Os sistemas estruturais mistos têm sido bastante utilizados na construção civil. No Brasil, a partir da década de 1980, houve uma crescente demanda das estruturas metálicas na construção de edifícios de múltiplos pavimentos, apesar de ainda competirem com sistemas estruturais em concreto armado.

O comportamento de estruturas mistas constitui uma linha de pesquisa nova na área de Estruturas no Laboratório de Engenharia Civil da UENF. Propõe-se, neste trabalho, realizar uma análise térmica de vigas mistas aço-concreto em diversas situações. O estudo de vigas mistas por meio de análise numérica é um tema bastante abrangente, pois possibilita análises detalhadas dos aspectos de interesse do sistema misto, como, por exemplo, a elevação da temperatura ao longo do tempo em pontos específicos da seção transversal e a influência das propriedades dos materiais aço, concreto e de revestimento na taxa de aumento da temperatura. Além disso, o caso de estruturas em situação de incêndio é um assunto que desperta bastante interesse para desenvolver essa pesquisa e de grande importância por estar relacionado a segurança estrutural.

Diante disso, com a obtenção de resultados numéricos satisfatórios, acredita-se que o desenvolvimento deste estudo possa contribuir para o dimensionamento de vigas mistas em situação de incêndio e para o entendimento da influência da proteção térmica.

## 1.5 - Estrutura da dissertação

O presente trabalho é constituído de assuntos referentes ao comportamento de vigas mistas aço concreto, em casos de situação de incêndio, e também aborda assuntos de revestimentos térmicos. Ao longo deste primeiro capítulo foi apresentada a proposta do presente trabalho, incluindo uma introdução ao estudo de vigas mistas submetidas a incêndio, objetivos e justificativa.

O Capítulo 2 trata de fundamentos teóricos, como o comportamento estrutural das vigas mistas e dos conectores de cisalhamento, necessários para uma melhor compreensão deste trabalho.

O Capítulo 3 aborda fundamentos teóricos sobre vigas mistas em situação de incêndio, mostrando também os tipos de revestimento térmico. Além disso, são mencionados procedimentos adotados pelas normas brasileiras NBR 14323 (ABNT, 2013) e NBR 14432 (ABNT, 2001).

Já no Capítulo 4, são apresentados aspectos referentes à modelagem numérica desenvolvida para vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio, em que são mencionados os tipos de elementos finitos utilizados, as condições de contorno, bem como são apresentadas as dimensões da seção transversal e propriedades dos materiais utilizados.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados, as respectivas análises e comparações feitas entre a modelagem numérica e o método simplificado de cálculo.

Finalmente, no Capítulo 6, encontram-se as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho, em relação aos procedimentos adotados para a modelagem numérica e também à análise dos resultados comparados. Ainda neste capítulo, são feitas algumas sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos referentes à análise numérica de vigas mistas aço-concreto em incêndio.

## CAPÍTULO 2 – VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO

### 2.1 - Introdução

As vigas mistas aço-concreto são elementos estruturais que resultam da associação de vigas de aço com lajes de concreto, e esta associação é garantida através da ligação por meio de conectores de cisalhamento, de tal forma que ambos funcionem como um conjunto para resistir à flexão. Em edifícios, o perfil mais utilizado dessas vigas de aço é do tipo "I".

Nos sistemas de vigas mistas presentes nas edificações, podem ser encontradas lajes formadas por elementos pré-fabricados ou de concreto moldadas *in loco*, com face inferior plana ou com fôrma de aço incorporada. Alguns dos tipos mais usuais de seções de vigas mistas são mostrados na Figura 2.1.

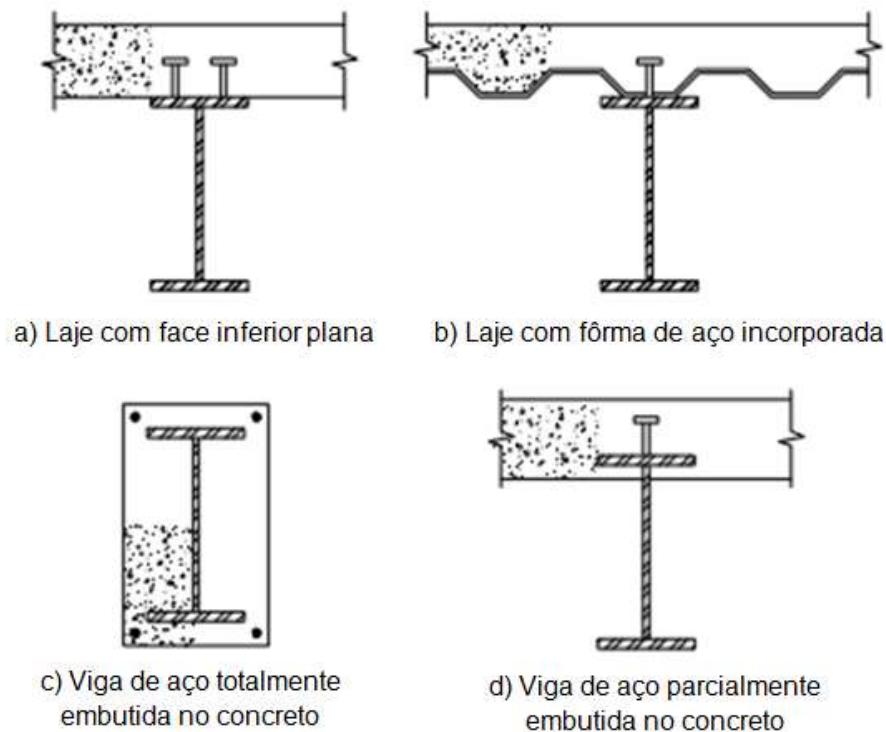


Figura 2.1: Alguns tipos mais usuais de vigas mistas (MALITE, 1990).

Pode-se observar, como uma das vantagens da utilização de vigas mistas em sistemas de pisos, que a associação dos elementos viga de aço e laje de concreto resulta em um acréscimo de resistência e de rigidez, o que possibilita a redução da altura dos elementos estruturais, implicando em economia de material. A necessidade



de utilizar conectores de cisalhamento na interface aço-concreto pode ser apontada como a principal desvantagem desse sistema estrutural (ALVA, 2000).

As vigas mistas podem ser simplesmente apoiadas ou contínuas. Quando são simplesmente apoiadas, há uma maior eficiência do sistema misto para resistir a esforços de flexão, pois a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto, à compressão. As vigas contínuas apresentam um comportamento estrutural diferente das simplesmente apoiadas, por haver momentos fletores negativos, trazendo vantagem sob o ponto de vista de estabilidade global da estrutura, no entanto, pode ocorrer a flambagem lateral com distorção causando a perda dessa instabilidade. Neste capítulo, serão mostrados alguns aspectos e condições de dimensionamento de vigas mistas de alma cheia biapoiadas.

Com relação ao método construtivo, o escoramento da laje pode limitar os deslocamentos verticais da viga de aço na fase construtiva; no entanto, pode-se optar pelo não escoramento se houver necessidade de maior velocidade de construção.

## 2.2 - Comportamento estrutural

O comportamento estrutural da interface aço-concreto de vigas mistas submetidas à flexão depende do grau de conexão, que está associado à capacidade da viga em atingir o máximo momento resistente sem a ruptura da ligação, e do grau de iteração, que está associado com o escorregamento relativo.

### 2.2.1 - Grau de conexão

O grau de conexão pode ser completo ou parcial, e se refere à resistência das seções de aço e concreto e à capacidade de resistência dos conectores de cisalhamento, por meio do equilíbrio longitudinal de forças.

Conforme a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), o grau de conexão de cisalhamento da viga mista é representado pelo parâmetro  $\eta$ , definido como:

$$\eta = \frac{\sum Q_{rd}}{F_{hd}} \quad (2.1)$$

sendo:

$\eta$  o grau da conexão;

$Q_{rd}$  a resistência da conexão de cisalhamento dos conectores;

$F_{hd}$  a resistência da conexão de cisalhamento mínima, que se estabelece para situação de conexão de cisalhamento completa.

A conexão de cisalhamento total ou completa ( $\eta = 1,0$ ) existe quando um aumento na quantidade ou na resistência dos conectores não implica no aumento da resistência à flexão da viga mista. Desta forma, a seção que está sendo mais solicitada na viga mista atinge sua capacidade máxima à flexão antes que ocorra a falha na conexão. Com isto, o somatório da resistência da conexão de cisalhamento ( $Q_{rd}$ ) dos conectores deve ser maior ou igual que a menor das resultantes axiais obtidas nos elementos de concreto ( $P_c = 0,85f_cA_c$ ) e de aço ( $P_s = A_s f_y$ ).

Quando existe um número relativamente pequeno de conectores e a resistência de conexão de cisalhamento ( $Q_{rd}$ ) é menor que as resultantes axiais das seções de concreto ( $P_c$ ) e de aço ( $P_s$ ), ocorre a conexão de cisalhamento parcial ( $\eta = 0,4$ ). Neste caso, com o equilíbrio longitudinal de forças, a resistência da conexão de cisalhamento controla a capacidade de flexão da viga mista.

Quando o grau de conexão de cisalhamento é muito baixo, ou seja,  $\eta$  menor que 0,4, deve-se desprezar a contribuição da laje de concreto na resistência da viga mista, considerando-se que apenas a seção de aço resiste aos esforços de flexão.

De acordo com os estudos feitos por JONHSON (1981), o deslizamento relativo máximo aumenta à medida que o vão da viga aumenta (para um certo grau de conexão de cisalhamento), de modo que os conectores de cisalhamento sejam capazes de suportar um deslizamento relativo maior antes que ocorra qualquer redução de carregamento, ou seja, os conectores têm que apresentar um comportamento mais dúctil. Desse modo, aplica-se o uso da conexão de cisalhamento parcial às vigas com vãos menores que 20 metros, o que, na prática, fica restrito às vigas de edifícios.

### **2.2.2 - Grau de interação**

O grau de interação está relacionado com o trabalho em conjunto entre ambos os materiais, influenciando na eficiência do comportamento das vigas mistas na interface aço-concreto. A interação pode ser nula, total ou parcial, conforme ilustra a Figura 2.2.

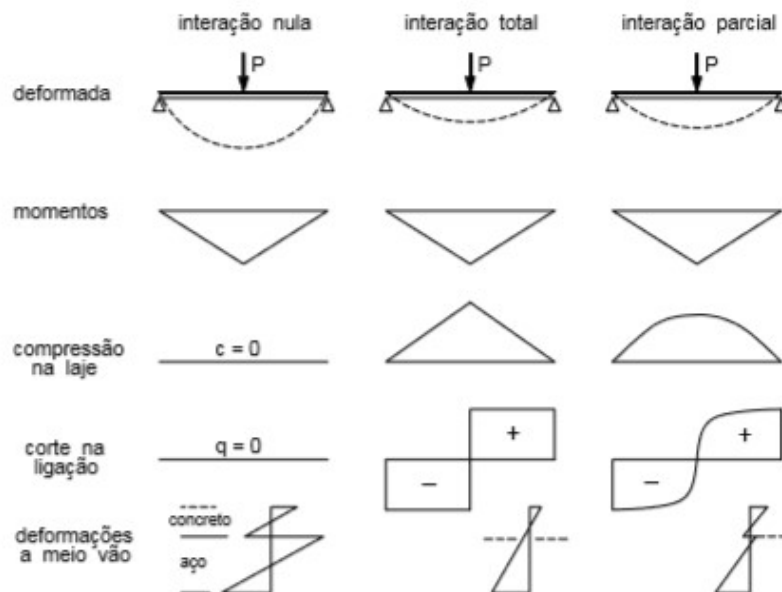


Figura 2.2: Interação entre o aço e o concreto no comportamento de viga mista (MALITE, 1990).

Ocorre a interação nula quando a seção de aço é projetada para suportar todo o peso da laje mais o carregamento do pavimento, sem existir qualquer ligação ou atrito na interface. Assim, os elementos comportam-se independentemente, ou seja, a superfície inferior da laje de concreto é livre para deslizar sobre a mesa superior da viga de aço e, conseqüentemente, pode haver escorregamentos entre os materiais do sistema. Neste caso, surgem para a laje de concreto e a viga de aço linhas neutras também independentes.

Considera-se a existência de interação completa ou total quando há uma ligação perfeita entre os elementos estruturais (viga de aço e laje de concreto) que se deformam como um único elemento, e também admite-se a inexistência de escorregamento longitudinal e afastamento vertical entre viga e laje. Diante disto, deve-se assumir a hipótese de que as seções planas permanecem planas e a distribuição de deformações apresenta apenas uma linha neutra.

A interação parcial é considerada quando existe escorregamento relativo entre as superfícies de aço e concreto, implicando em uma descontinuidade no diagrama de deformações.

Conforme mencionado em ALVA (2000), o efeito do escorregamento afeta a distribuição de tensões na seção, a distribuição do fluxo de cisalhamento longitudinal na conexão e a deformabilidade das vigas. O efeito de escorregamento na interação parcial provoca o acréscimo de deslocamentos, que é considerado pelas normas em geral. Pode-se fornecer um acréscimo na resistência ao momento fletor e também na

rigidez da viga com uma utilização adequada de conectores de cisalhamento. Isso pode conduzir a uma redução de custos com a possibilidade de se reduzir as dimensões da seção para um mesmo carregamento.

Em MALITE (1990), é mencionado que, mesmo em vigas com grau de conexão total, ocorrerá algum escorregamento relativo. Porém, ainda assim continua sendo utilizada a terminologia interação total, principalmente em normas, pois se entende que o escorregamento relativo pode ser desprezado nos cálculos.

O efeito da interação parcial em vigas mistas com grau de conexão total foi estudado em OEHLERS *et al.* (1997). Para vigas mistas usuais em edifícios, a interação parcial tem poucos efeitos sobre a capacidade da viga à flexão, quando a resultante de compressão da seção de concreto é maior que a resultante de tração na seção de aço. No entanto, em seções mais robustas, como em pontes, onde a resultante de tração na seção de aço é muito maior que a resultante de compressão do concreto, existe uma redução da capacidade à flexão da viga por conta da interação parcial.

### **2.2.3 - Largura efetiva**

Conforme a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), para vigas mistas de aço-concreto biapoiadas, a largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

### **2.3 - Conectores de cisalhamento**

Os conectores de cisalhamento são elementos metálicos responsáveis pela ligação entre o elemento de aço e a laje de concreto das vigas mistas, garantindo o trabalho em conjunto desses materiais. As principais funções desses elementos são transferir forças de cisalhamento longitudinais do concreto para o aço e restringir o escorregamento longitudinal e a separação vertical entre a laje e a viga, movimento conhecido como *uplift*.

Os conectores podem ser classificados em flexíveis e rígidos, em função do comportamento estrutural. A Figura 2.3 mostra exemplos de tipos de conectores e a Figura 2.4 ilustra os tipos mais usuais de conectores flexíveis (a,b,c) e rígidos (d,e).



Figura 2.3: Exemplos de tipos de conectores (ALVA, 2000).

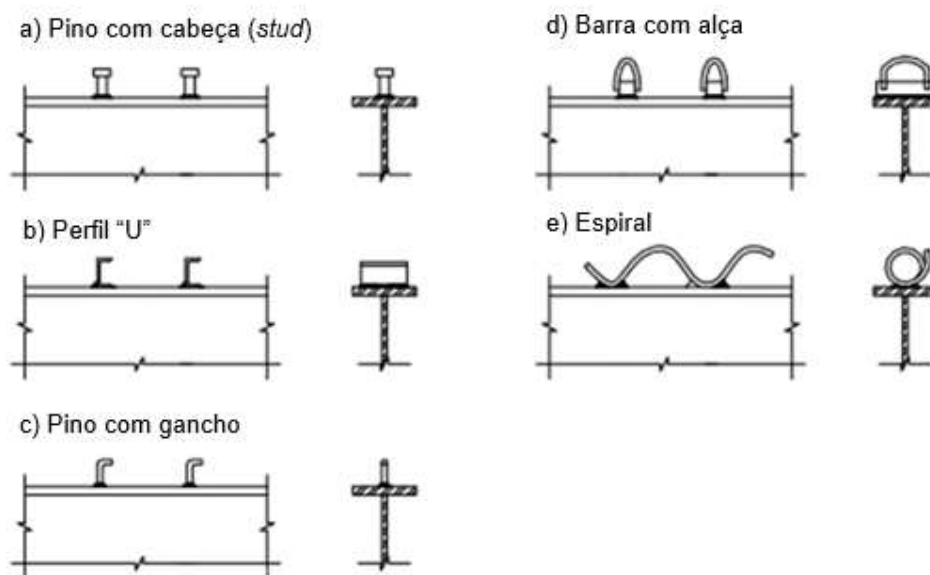


Figura 2.4: Tipos usuais de conectores de cisalhamento (TRISTÃO, 2002).

Devido à facilidade de fabricação utilizando o processo de soldagem semiautomático e por apresentarem a mesma resistência em todas as direções, os conectores do tipo pino com cabeça (*stud*) são os mais utilizados dentre os flexíveis. Esse conector é instalado sobre a mesa superior da viga de aço e o processo de soldagem resulta em uma solda de penetração total, podendo o conector ser considerado engastado na viga de aço.

Classificar um conector rígido está relacionado com a capacidade de restrição ao escorregamento imposta pela ligação da viga com a laje. Para determinar o comportamento dúctil dos conectores, deve ser feita a análise da relação existente entre a força de cisalhamento transmitida pelo conector e o escorregamento relativo na interface aço-concreto, como é ilustrado na Figura 2.5.

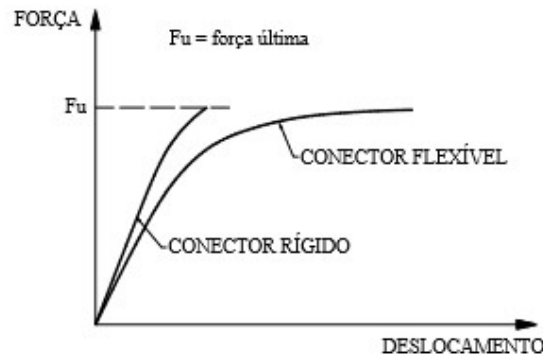


Figura 2.5: Relação força-deslocamento nos conectores de cisalhamento (ALVA, 2000).

Pode-se observar que um conector flexível sob carregamento crescente pode continuar a deformar-se mesmo após atingir a sua resistência máxima, sem que haja ruptura, o que permite admitir que os conectores vizinhos passem a receber maior força de cisalhamento e também atinjam a sua capacidade total. Quando ocorre ruptura da ligação aço-concreto, a flexibilidade dos conectores garante que o colapso de uma viga mista seja do tipo dúctil.

Em OEHLERS & COUGHLAN (1986), foram estudados conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (*stud*) com relação à rigidez ao cisalhamento. Esses estudos mostram que os conectores embutidos em concretos mais resistentes apresentam uma maior rigidez em relação àqueles embutidos em concretos menos resistentes.

Em YAM & CHAPMAN (1968), foi observado que a distribuição do deslizamento relativo na interface aço-concreto depende de alguns fatores, tais como: a relação não linear entre carregamento/escorregamento para determinado conector de cisalhamento, a distribuição de conectores, a distribuição do carregamento aplicado e do vão, entre outros.

### 2.3.1 - Ação dos conectores de cisalhamento

A força de cisalhamento longitudinal que é gerada na interface aço-concreto das vigas mistas é transferida da laje de concreto para a viga de aço por meio dos conectores pino de cabeça (*stud*), como ilustra a Figura 2.6.

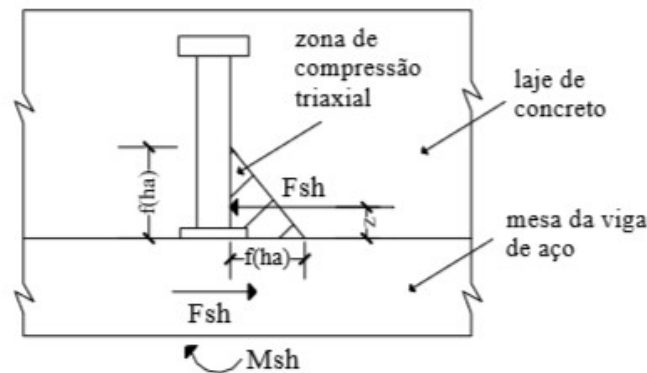


Figura 2.6: Transferência de forças de cisalhamento longitudinal do conector tipo pino com cabeça (OEHLERS & PARK, 1992).

Segundo OEHLERS & PARK (1992), o fuste do conector é submetido à força de cisalhamento ( $F_{sh}$ ) a uma distância  $z$  da mesa do perfil metálico. Essa força gera um momento ( $M_{sh}$ ) devido a essa excentricidade  $z$  e, dessa forma, essas forças atuantes resultam em tensões de cisalhamento e normal aplicadas ao corpo do conector. A força de cisalhamento ( $F_{sh}$ ) e a ordem de grandeza da excentricidade  $z$  influenciam na magnitude dessas tensões. A excentricidade  $z$  varia em função da rigidez entre o conector e o concreto e se a rigidez do concreto é muito maior que a rigidez apresentada pelo conector, a excentricidade  $z$  tenderá a zero; caso contrário,  $z$  tenderá a um valor correspondente à metade da altura do conector pino com cabeça (*stud*).

Conforme mencionado em OEHLERS & PARK (1992), a zona de concreto que se encontra imediatamente em frente ao conector de cisalhamento, denominada “zona de compressão triaxial”, está sujeita a elevadas tensões de compressão que também dependem da altura efetiva do conector ( $h_a$ ). Para o conector pino com cabeça (*stud*), a altura efetiva ( $h_a$ ) é 1,8 vezes o seu diâmetro.

Existem diversos mecanismos que levam à ruptura do conector pino com cabeça quando ocorre a transferência das forças de cisalhamento longitudinal da laje para a viga e, de acordo com OEHLERS & PARK (1992), podem ser citados dois mecanismos que podem levar esse tipo de conector à ruptura:

a) Quando o concreto for menos rígido quando comparado ao conector, o concreto começa a fissurar, tornando-se menos rígido antes que o material do conector plastifique, proporcionado, assim, o aumento da excentricidade  $z$ . Conseqüentemente, as tensões normais no pino do conector aumentarão mais rapidamente que as tensões de cisalhamento, conduzindo o conector à ruptura.

b) Se o conector for menos rígido que o concreto,  $z$  diminui, reduzindo assim o momento ( $M_{sh}$ ) no conector. Além disso, a zona de compressão triaxial reduzirá, já que diminuirá a altura efetiva do conector, ocasionando, assim, a ruptura do concreto na zona de compressão triaxial e, conseqüentemente, o aumento de  $z$ , já que a rigidez do elemento concreto diminui. A partir daí, retorna-se ao mecanismo de ruptura descrito no item (a).

Portanto, na conexão de cisalhamento, a resistência do conector tipo pino com cabeça (*stud*) depende da resistência e da rigidez do conector e do concreto na zona de compressão triaxial.

## 2.4 - Aspectos da fissuração na laje de concreto

Deve-se considerar, também, os modos de fissuração que ocorrem na laje por consequência da redução gradual da resistência e da rigidez do concreto na zona de compressão triaxial.

Como mencionado em TRISTÃO (2002), a redução da restrição triaxial desta zona é consequência da fissuração que ocorre no concreto quando o conector aplica uma força concentrada na laje. OEHLERS (1989) apresenta três modos de fissuração na laje, ilustrados na Figura 2.7 e descritos como:

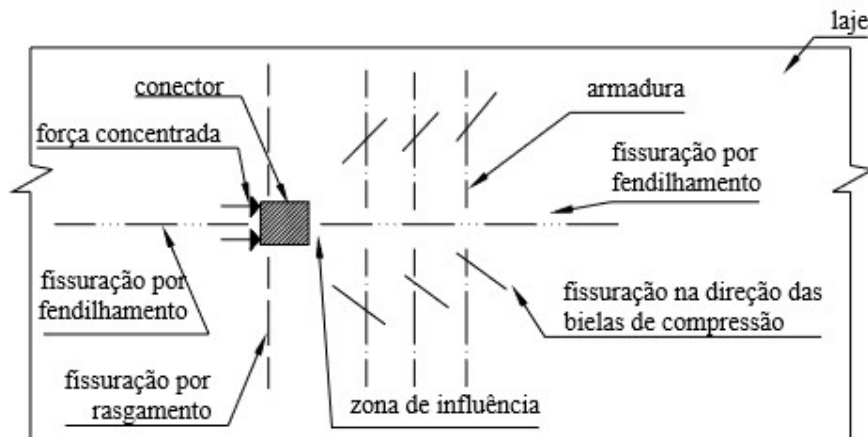


Figura 2.7: Tipos de fissuração na laje devido à força concentrada aplicada pelo conector (OEHLERS, 1989).

a) Fissuração devido ao rasgamento, que se propaga transversalmente ao conector e depende da força de compressão no plano da laje.



b) Fissuração que se propaga na direção das bielas de compressão do concreto. Neste caso, as fissuras ocorrem perto da zona de influência e, portanto, podem afetar a restrição triaxial.

c) Fissuração por fendilhamento em frente ao conector. A propagação dessas fendas induz ao fendilhamento atrás do conector, diminuindo a restrição triaxial na zona de influência. Desta forma, é a mais nociva ao concreto, tendo como consequência a sua ruptura.

Conforme OEHLERS (1989), a armadura transversal não impede o fendilhamento do concreto, porém, limita a propagação das fissuras. Portanto, nesse caso, a resistência ao cisalhamento do conector somente depende da resistência e da rigidez do material do conector e da laje de concreto, tendo, a armadura transversal que compõe a laje, um papel importante apenas no seu confinamento.

Armaduras transversais adicionais àquelas normalmente empregadas na laje de concreto armado são utilizadas para limitar fissurações na laje de concreto na região onde se encontram as linhas de conectores de cisalhamento. Esta armadura deverá ser uniformemente distribuída ao longo do vão da viga e posicionada na face inferior da laje, como ilustra a Figura 2.8.

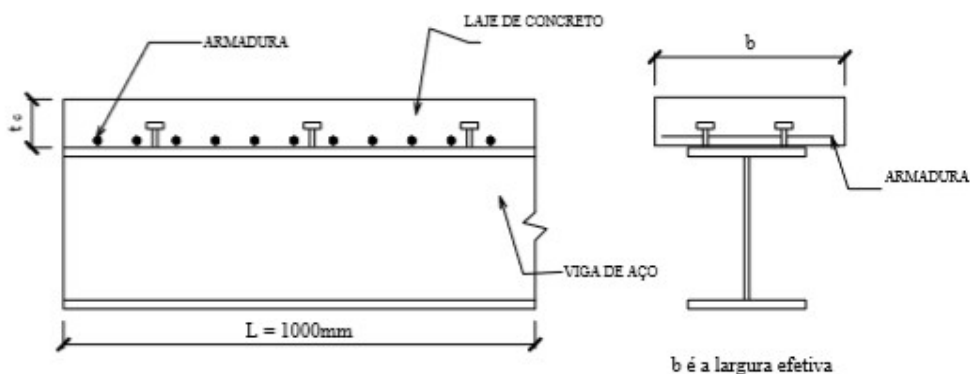


Figura 2.8: Disposição das armaduras transversais (adicionais) na laje de concreto (TRISTÃO, 2002).

Conforme demonstram os estudos em DAVIES (1969) *apud* KIRCHHOF (2004), em vigas mistas simplesmente apoiadas com variações nas taxas das armaduras transversais que compõem a laje, a quantidade de armadura transversal tem influência na resistência à flexão da viga mista. Diante disso, a resistência última à flexão alcançada pela viga mista será maior à medida em que aumenta a taxa de armadura transversal na laje de concreto, dentro de uma quantidade tolerável.

## CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O INCÊNDIO E AS AÇÕES TÉRMICAS NAS ESTRUTURAS DE AÇO E CONCRETO

### 3.1 - Introdução

As vigas mistas são elementos estruturais empregados em diversos tipos de obras, tais como edifícios garagem, edificações comerciais de múltiplos andares, edificações industriais, *shopping centers*, etc. Nessas edificações, a escolha do material a ser utilizado para compor a estrutura deve ser feita analisando não somente o custo da obra, tempo de execução e problemas relativos à corrosão, mas também a possibilidade da ocorrência de incêndio, principalmente quando a taxa de ocupação de uma edificação é alta, ou seja, quando estão envolvidas vidas humanas.

Quando um incêndio ocorre em um edifício, a sua ação se faz sentir diretamente nos elementos estruturais que constituem o compartimento de incêndio e, indiretamente, em zonas mais ou menos afastadas deste. Antes de ocorrer o incêndio, a estrutura de um edifício está submetida a um certo estado inicial de tensão e deformação, causadas pela ação do peso próprio e sobrecargas. A este estado inicial de tensão vem sobrepor-se um novo estado de tensão, resultante do aquecimento diferencial a que os elementos estruturais ficam submetidos. Devido aos elementos estruturais estarem interligados, as dilatações térmicas são os principais fatores que dão origem a esse novo estado de tensão, que podem ser restringidas e são variáveis no tempo, à medida que o incêndio se desenvolve. Em certas situações, elementos relativamente afastados do compartimento de incêndio poderão ser os primeiros a entrar em colapso, em virtude do estado de tensão que as deformações de origem térmica da zona diretamente aquecida impõem ao resto da estrutura (PANNONI, 2015).

Os materiais de construção, como o aço e o concreto, quando são submetidos a altas temperaturas, decorrentes de incêndio, apresentam variações em suas propriedades mecânicas e térmicas, comprometendo a capacidade do elemento estrutural de resistir às ações aplicadas. Considerar a resistência ao fogo das estruturas é uma forma de precaução quanto a um possível colapso estrutural. Porém, o meio mais comum de proteger um elemento em situações de incêndio é através da proteção passiva estrutural.

A preocupação por parte dos órgãos normativos com a ocorrência de incêndio é de preservar a integridade física do ser humano, ou seja, não está ligada ao

interesse de preservar o patrimônio, mas sim garantir que a estrutura permaneça preservada por um período de tempo considerado suficiente para assegurar a total evacuação das pessoas. A questão da perda da edificação como patrimônio deverá ser garantida por meio de contratos de seguros.

### **3.2 - Fatores que influenciam a severidade de um incêndio**

O incêndio é verificado quando o fogo se encontra generalizado, ou seja, o fogo está fora de controle e se alastra rapidamente com grande intensidade. O fogo ou incêndio é o produto da combustão de um material, provocada por uma fonte de calor (ou de ignição), que ocorre na presença do oxigênio (comburente). Para ocorrência de um incêndio são necessários esses três elementos:

a) Combustível é toda substância oxidável (sólido, líquido ou gasoso) susceptível à combustão, capaz de queimar uma vez iniciada a reação.

b) Comburente é todo elemento químico capaz de alimentar o processo de combustão, dentre os quais, o oxigênio se destaca como o mais importante, que pode reagir com um combustível, produzindo a combustão.

c) Fonte de ignição é o agente que dá o início do processo de combustão. A reação química só ocorrerá inicialmente entre os dois reagentes se houver um agente que promova a ignição (partida inicial) do processo de combustão. As fontes de ignição mais comuns são as superfícies aquecidas, as fagulhas, as centelhas e as chamas.

Quando a superfície do material é atacada, há o desprendimento vagaroso de gases e liberação de calor. Em seguida, após ser alcançada a temperatura de ignição, a decomposição do material passa a se desenvolver rapidamente e absorvendo calor. Após isso, o corpo começa a queimar integralmente e os gases desprendidos também entram em processo de combustão. A combustão se manterá caso o balanço de aproveitamento do calor seja positivo, ou seja, se mais calor estiver sendo aproveitado pelo corpo do que perdido para o ambiente.

Eliminando-se um desses três elementos, o incêndio não ocorrerá. Alguns fatores influenciam na severidade de um incêndio, como o tipo e a quantidade de material combustível, as condições de ventilação do ambiente, a forma do edifício, o sistema de segurança contra incêndio e as propriedades térmicas dos materiais constituintes das paredes e do teto no compartimento.

### **3.3 - Normas brasileiras para estruturas de aço em situação de incêndio**

A verificação de estruturas de aço em situação de incêndio tornou-se uma etapa de fundamental importância para a elaboração e execução de projetos. Por essa razão, no Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), num trabalho conjunto com a Associação Brasileira dos Construtores de Estruturas Metálicas (ABCEM), elaboraram um texto-base para dimensionamento e segurança de estruturas metálicas em situação de incêndio, desenvolvido em total compatibilidade com as normas brasileiras já em vigor. O texto foi aprovado e, em 1999, foi publicada a norma brasileira NBR 14323. Com vistas a fornecer informações necessárias e em caráter complementar, foi apresentada à comunidade científica e técnica a NBR 14432, publicada em 2000. Atualmente encontram-se aprovadas e publicadas as seguintes normas técnicas:

a) NBR 14323 (ABNT, 2013), cujo objetivo é fixar condições para o dimensionamento em situação de incêndio de elementos estruturais de aço e de elementos estruturais mistos aço-concreto (vigas mistas, pilares mistos e lajes mistas) e de ligações executadas com parafusos ou soldas. Apresenta ferramentas que possibilitam determinar a temperatura nos elementos de aço ao longo do tempo sem e com material de proteção térmica, em função da temperatura dos gases no ambiente em chamas, e a variação das propriedades do aço com a temperatura.

b) NBR 14432 (ABNT, 2001), cujo objetivo é estabelecer condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural. Para os elementos de compartimentação, devem ser atendidos requisitos de estanqueidade e isolamento por um tempo suficiente para possibilitar a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, a segurança das operações de combate ao incêndio e a minimização de danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública.

### **3.4 - Resistência ao fogo dos elementos estruturais**

A resistência ao fogo dos materiais construtivos é um dos meios passivos de proteção contra incêndio apropriado para este fim. De acordo com a norma NBR 14432 (ABNT, 2001), resistência ao fogo é uma propriedade de um elemento de

construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento.

A norma NBR 14323 (ABNT, 2013) recomenda que os elementos estruturais, com ou sem proteção contra incêndio, sejam estáveis e resistentes aos esforços solicitantes em temperatura elevada, a fim de evitar o colapso da estrutura em condições que prejudiquem a fuga dos usuários da edificação e, quando for o caso, prejudiquem a aproximação e o ingresso de pessoas e equipamentos para as ações de combate ao fogo.

Ainda segundo a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), o dimensionamento de uma estrutura em situação de incêndio deve ser feito por meio de resultados de ensaios ou por meio de métodos analíticos de cálculo, ou, ainda, por uma combinação de ensaios e métodos analíticos. Por meio de métodos analíticos de cálculo, pode ser usado o método simplificado de dimensionamento, que será discutido neste trabalho, ou métodos avançados de dimensionamento, que são aqueles em que os princípios da engenharia de incêndio são aplicados de maneira realística a situações específicas. O esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, obtido a partir de qualquer método de dimensionamento, não pode ser tomado com valor superior ao esforço resistente de cálculo à temperatura ambiente.

Uma estrutura pode ser reutilizada após um incêndio se for adequadamente verificada e se for concluído que não existe necessidade de recuperação da estrutura se o incêndio foi de pequena severidade ou se a estrutura tinha a proteção necessária. Se houver necessidade de recuperação, a estrutura deve voltar a ter as características que apresentava antes do incêndio, incluindo todas as capacidades últimas e de serviço exigidas, para, então, poder ser utilizada.

### **3.5 - Ações térmicas e mecanismos de transferência de calor**

A transferência de calor é a ciência que estuda as transferências de energia entre corpos materiais ocasionadas por diferenças de temperatura. Essa energia é definida como calor. Para a determinação da elevação de temperatura em elementos estruturais em situação de incêndio é necessário determinar a quantidade de calor que chega a esses elementos. O conhecimento sobre os conceitos de transferência de calor é essencial para compreender o comportamento do incêndio e, conseqüentemente, a análise térmica das estruturas de aço. Para um entendimento

adequado dos mecanismos de transferência de calor, é preciso que se tenha conhecimento das definições de duas grandezas básicas: Temperatura e Calor.

Temperatura é a medida da energia cinética média dos átomos ou moléculas do sistema. Permite determinar o quanto quente ou fria está uma substância, bem como pode ser usada para prever a direção da transferência de calor.

Calor é a energia térmica transferida entre dois sistemas em contato, do mais quente para o mais frio. Dessa forma, para que haja transferência de calor num sistema, é necessário que haja diferença de temperaturas.

Habitualmente consideram-se três mecanismos básicos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Na realidade, a distribuição de temperatura em um meio é controlada pelos efeitos combinados desses três modos de transferência de calor.

### 3.5.1 - Transferência de calor por condução

A condução é um processo pelo qual o calor é transferido de uma região de alta temperatura para outra de baixa temperatura em um meio (sólido, líquido ou gasoso).

Na transmissão de calor por condução, a energia é transmitida através do movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas sem que haja transferência de massa. As moléculas mais rápidas, que estão na região de altas temperaturas, colidem com as mais lentas, transmitindo, para estas, parte de seu conteúdo energético, e assim por diante.

Segundo a lei fundamental que rege a transmissão de calor por condução, a quantidade de calor que atravessa uma área  $A$ , normal à direção do fluxo calorífico, na unidade de tempo, é proporcional ao produto da área pelo gradiente térmico:

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dn} \quad (3.1)$$

onde:

$Q$  é a quantidade de calor (Watts) que atravessa a área  $A$  segundo a sua normal  $n$ ;  
 $\lambda$  é a constante de proporcionalidade, denominada de condutividade térmica do material;

$A$  é a área da seção transversal através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo;

$d\theta/dn$  é o gradiente de temperatura na seção, isto é, a razão de variação da temperatura  $\theta$  com a distância, na direção  $n$  do fluxo de calor.

A equação (3.1) é chamada de lei de Fourier da condução de calor, em homenagem ao físico-matemático Joseph Fourier, que contribuiu significativamente para os estudos sobre o tratamento analítico da transferência de calor através da condução.

A condutividade térmica do material depende da sua composição química, do seu estado físico, da sua textura e da sua temperatura. O sinal negativo na expressão anterior serve para assegurar que o fluxo de calor ocorre no sentido da diminuição da temperatura. A quantidade de calor por unidade de área e por unidade de tempo é chamada fluxo de calor ( $W/m^2$ ), sendo dada por:

$$\varphi = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{d\theta}{dn} \quad (3.2)$$

Esta é a expressão matemática para o princípio básico da condução de calor unidimensional em regime permanente, ou seja, a temperatura não apresenta variação com o tempo. Entretanto, o fluxo térmico é uma grandeza vetorial cuja direção será sempre normal a uma superfície de temperatura constante, conhecida como isoterma. Em problemas bidimensionais, a temperatura é função de duas coordenadas do espaço  $x$  e  $y$  e também do tempo  $t$ , ou seja,  $\theta = \theta(x, y, t)$ . Generalizando, o fluxo térmico, em um meio anisotrópico e bidimensional, pode ser expresso da seguinte forma, em coordenadas cartesianas:

$$\varphi_n = -\lambda_n \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\left(\lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot n_x + \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \cdot n_y\right) \quad (3.3)$$

onde  $\varphi$  é o fluxo de calor na direção  $n$ , sendo  $n_x$  e  $n_y$  os co-senos diretores do vetor normal unitário exterior ao isoterma.

### 3.5.2 - Transferência de calor por convecção

A convecção é o mecanismo de transferência de calor entre um sólido e um fluido em movimento nas adjacências deste sólido, desde que exista uma diferença

de temperatura entre eles. A transferência de calor por convecção tem um importante papel na propagação da chama, no transporte ascendente da fumaça e na permanência dos gases quentes no teto ou para fora das janelas do compartimento em chamas.

As correntes de convecção num fluido estão sempre associadas a diferenças de pressão. Quando as correntes de convecção se desenvolvem devido unicamente à diferença de densidade do fluido oriunda dos gradientes térmicos, a convecção é dita natural. Se as diferenças de pressão forem motivadas por causas externas, como ventiladores, bombas, explosões ou reações de queima, a convecção é dita forçada.

Na análise térmica de uma estrutura em situação de incêndio, a convecção ocorre entre um fluido e a superfície de um sólido. Portanto, as velocidades desenvolvidas pelo fluido como consequência das correntes de convecção não necessitam ser determinadas, sendo o processo de transferência de calor por convecção utilizado apenas como um tipo de condição de contorno para o domínio sólido.

A quantidade de calor que atravessa uma área  $A$  é proporcional à diferença entre a temperatura do fluido e a temperatura da superfície do sólido. Essa relação é conhecida como lei do resfriamento de Newton, em homenagem ao cientista inglês Isaac Newton, e é expressa por:

$$Q = \alpha_c A (\theta_f - \theta_s) \quad (3.4)$$

onde:

$Q$  é a quantidade de calor que atravessa a área  $A$ ;

$\alpha_c$  é a constante de proporcionalidade, denominada coeficiente de transferência de calor por convecção;

$A$  é a área da interface sólido-fluido através da qual o calor flui por convecção, medida perpendicularmente à direção do fluxo;

$\theta_s$  é a temperatura da superfície do sólido exposto ao fogo;

$\theta_f$  é a temperatura média do fluido.

O fluxo de calor devido à convecção é dado por:

$$\varphi = \frac{Q}{A} = \alpha_c (\theta_f - \theta_s) \quad (3.5)$$



Em um incêndio, na medida em que o ar é aquecido, as moléculas de ar da região aquecida se tornam menos densas e tendem a subir. Ao subirem, podem se chocar com elementos estruturais (vigas e lajes, por exemplo). Neste caso, com o choque das moléculas de ar aquecido em movimento com a superfície dos elementos estruturais, ocorre a transferência de calor por convecção.

A norma NBR 14323 (ABNT, 2013) recomenda, simplificada, o valor de  $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$  para o coeficiente de transferência de calor por convecção  $\alpha_c$  entre o gases e a superfície da estrutura. GHOJEL (1998) afirmou que, para incêndios naturais, bons resultados são obtidos se  $\alpha_c$  for assumido variando de zero, no início da combustão, até um valor máximo, quando as temperaturas dos gases e do elemento de aço se tornam iguais ( $t = t_{g=s}$ ). O modelo proposto por Ghojel pode ser expresso por:

$$\alpha_c = \frac{50}{t_{g=s}} t \text{ W/m}^2\cdot\text{°C para } t \leq t_{g=s} \quad (3.6)$$

$$\alpha_c = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C para } t \geq t_{g=s} \quad (3.7)$$

sendo o parâmetro  $t_{g=s}$  calculado pela relação exponencial:

$$t_{g=s} = 500e^{0.0009t_s^{max}} \quad (3.8)$$

onde  $t_{g=s}$  e  $t_g^{max}$  devem ser dados em segundos e  $t_g^{max}$  deve ser obtido por curvas de temperatura de incêndios reais, encontradas através de ensaios. Segundo GHOJEL (1998), os resultados obtidos com o modelo apresentado se mostraram muito próximos dos resultados obtidos através de ensaios.

### 3.5.3 - Transferência de calor por radiação

Contrariamente à convecção e à condução, a radiação não necessita da presença de um meio material, pois é feita por meio de ondas eletromagnéticas que podem viajar no vácuo.

Simplificada, o mecanismo da radiação consiste na emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo aquecido, que, ao serem absorvidas por um receptor, transformam-se em energia térmica. Parte da radiação também é refletida e transmitida. A radiação é muito importante nos incêndios porque é o principal

mecanismo de transferência de calor das chamas para a superfície do combustível. O fluxo máximo de calor que pode ser emitido de uma superfície por radiação é dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\varphi = \sigma\theta^4 \quad (3.9)$$

onde:

$\varphi$  é o fluxo de calor emitido pela superfície aquecida, em W/m<sup>2</sup>;

$\sigma$  é a constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann, igual a  $5,6697 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>;

$\theta$  é a temperatura absoluta da superfície (em Kelvin).

A equação (3.9) é válida para os chamados irradiadores perfeitos ou corpos negros. Os corpos reais não preenchem os requisitos de um irradiador perfeito, pelo que o fluxo de calor emitido corresponde a uma fração dos corpos negros, sendo expresso por:

$$\varphi = \varepsilon\sigma\theta^4 \quad (3.10)$$

sendo  $\varepsilon$  a emissividade da superfície radiante.

A transferência de calor da superfície radiante para a superfície receptora é dada por:

$$\varphi = \varepsilon_{res}\sigma(\theta_f^4 - \theta_s^4) \quad (3.11)$$

onde:

$\varphi$  é a quantidade líquida de calor emitido por radiação, em W/m<sup>2</sup>;

$\theta_s$  é a temperatura absoluta da superfície do sólido, em Kelvin;

$\theta_f$  é a temperatura absoluta média do fluido, em Kelvin;

$\varepsilon_{res}$  é a emissividade resultante das duas superfícies, dada por:

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_r} - 1} \quad (3.12)$$

sendo  $\varepsilon_r$  a emissividade da superfície receptora.

A emissividade  $\epsilon_{res}$  indica a eficiência da superfície radiante, podendo ter valores entre zero e 1,0. A maioria das superfícies quentes, partículas de fumaça ou chamas luminosas tem a emissividade entre 0,7 e 1,0 em situação de incêndio

### 3.6 - Propriedades mecânicas do aço e do concreto sob temperaturas elevadas

A exposição de materiais estruturais a altas temperaturas, como o aço e o concreto, provoca alterações nas suas propriedades mecânicas. Conseqüentemente, pode ocorrer o colapso de um elemento estrutural como resultado da sua incapacidade de resistir às ações aplicadas. Diante disso, alguns aspectos que devem ser levados em conta no dimensionamento de estruturas em situação de incêndio são: redução no módulo de elasticidade do aço ( $E$ ), redução na resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ) e redução na resistência à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ). A Figura 3.1 ilustra diagramas que relacionam a tensão relativa com a deformação linear específica do aço e do concreto em função da temperatura.

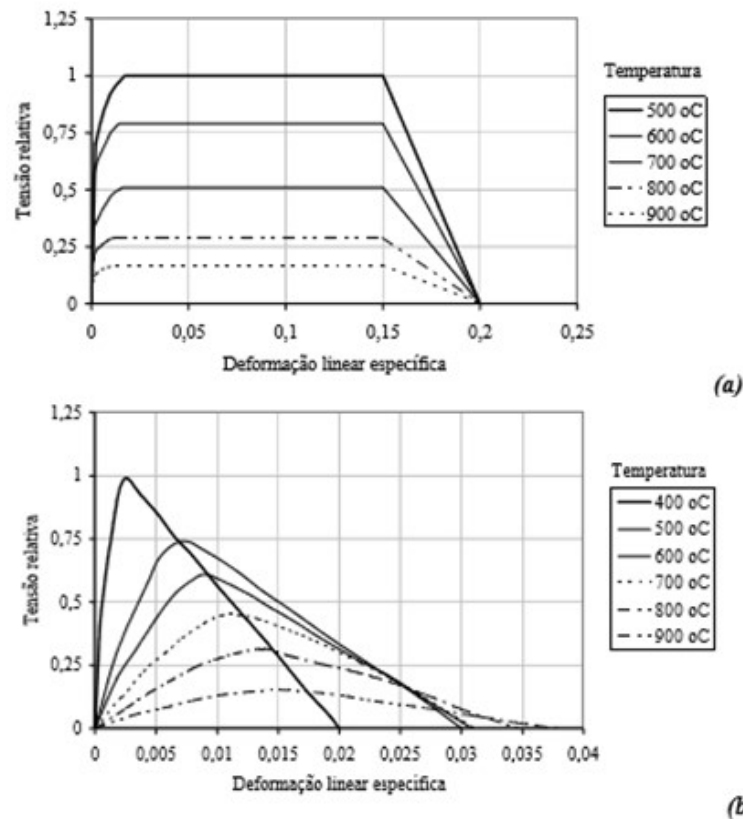


Figura 3.1: Diagramas tensão x deformação em função da temperatura: (a) aço e (b) concreto (KIRCHHOF, 2004).

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam fatores de redução, relativos aos valores a 20°C, para resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço em função da temperatura, de acordo com a norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e para resistência do concreto de densidade normal em função da temperatura, de acordo com a norma NBR 15200 (ABNT, 2012).

Tabela 3.1: Fatores de redução para o aço, NBR 14323 (ABNT, 2013).

Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	Fator de redução da resistência ao escoamento do aço <sup>a</sup> $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço <sup>a</sup> $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1000	0,040	0,045
1100	0,020	0,023
1200	0,000	0,000

<sup>a</sup> Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Tabela 3.2: Fator de redução para o concreto, NBR 15200 (ABNT, 2012).

Temperatura do concreto $\theta_c$ (°C)	Fator de redução para a resistência característica à compressão do concreto de densidade normal <sup>a</sup> $k_{c,\theta}$
20	1,00
100	1,00
200	0,95
300	0,85
400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

<sup>a</sup> Para valores intermediários da temperatura do concreto, pode ser feita interpolação linear.

onde:

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (3.13)$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (3.14)$$

$$k_{c,\theta} = \frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck}} \quad (3.15)$$

sendo:

$f_{y,\theta}$  a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura  $\theta_a$ ;

$f_y$  a resistência ao escoamento do aço a 20°C;

$E_\theta$  o módulo de elasticidade do aço a uma temperatura  $\theta_a$ ;

$E$  o módulo de elasticidade do aço a 20°C;

$f_{ck,\theta}$  a resistência característica à compressão do concreto de densidade normal a uma temperatura  $\theta_c$ ;

$f_{ck}$  a resistência característica à compressão do concreto de densidade normal a 20°C.

A massa específica  $\rho$  desses materiais pode ser considerada independente da temperatura. A massa específica para o aço tem valor igual a 7850 kg/m<sup>3</sup> e para o concreto de densidade normal, igual a 2400 kg/m<sup>3</sup>. No entanto, de acordo com a norma NBR 15200 (ABNT, 2012), a massa específica do concreto sofre variação com a temperatura devido à perda de água e pode ser determinada da seguinte maneira:

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \text{ para } 20^\circ C \leq \theta \leq 115^\circ C \quad (3.16)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \times (1 - 0,02(\theta - 115)/85) \text{ para } 115^\circ C < \theta \leq 200^\circ C \quad (3.17)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \times (0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) \text{ para } 200^\circ C < \theta \leq 400^\circ C \quad (3.18)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ C) \times (0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) \text{ para } 400^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C \quad (3.19)$$

sendo  $\rho(\theta)$  a massa específica do concreto a uma temperatura  $\theta$ .

### 3.7 - Propriedades térmicas do aço e do concreto sob temperaturas elevadas

As normas NBR 14323 (ABNT, 2013) e NBR 15200 (ABNT, 2012) apresentam valores a serem utilizados para a condutividade térmica, o calor específico e o alongamento do aço estrutural e do concreto de densidade normal.

### 3.7.1 - Condutividade térmica

Condutividade térmica é um parâmetro que indica a rapidez com que o calor é conduzido no interior de um dado material. As variações da condutividade térmica do aço e do concreto em função da temperatura são ilustradas na Figura 3.2 e na Figura 3.3, respectivamente.

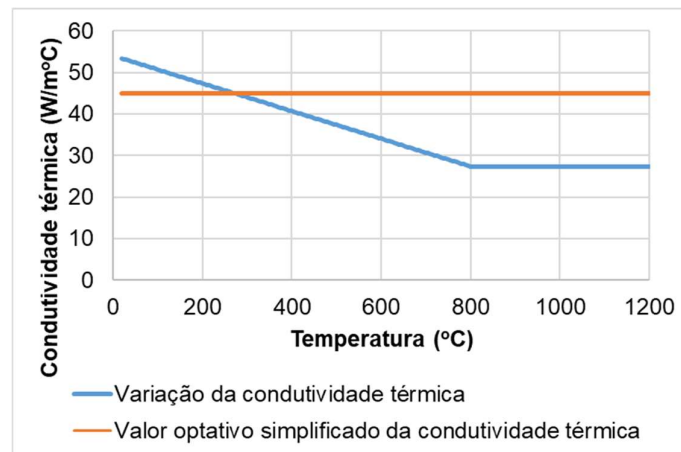


Figura 3.2: Condutividade térmica do aço em função da temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013).

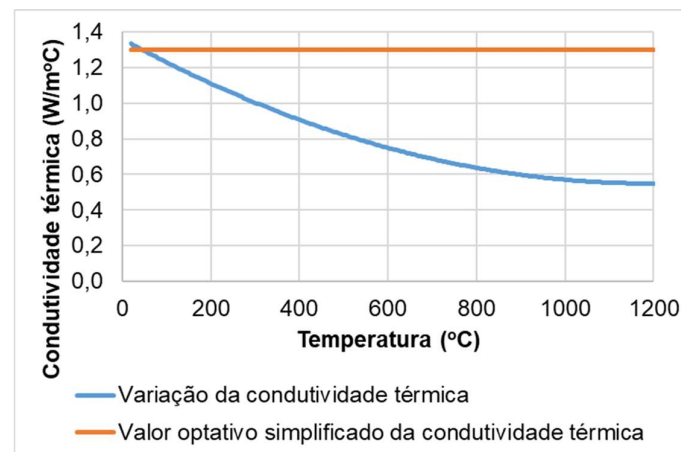


Figura 3.3: Condutividade térmica do concreto em função da temperatura, NBR 15200 (ABNT, 2012).

Pela Figura 3.2, a condutividade térmica do aço ( $\lambda_a$ ), em  $W/m^{\circ}C$ , pode ser determinada da seguinte forma:

$$\text{- para } 20^{\circ}C \leq \theta_a < 800^{\circ}C: \lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (3.20)$$

$$\text{- para } 800^{\circ}C \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}C: \lambda_a = 27,3 \quad (3.21)$$

onde  $\theta_a$  é a temperatura do aço, em graus Celsius.

De forma simplificada, o valor da condutividade térmica do aço pode ser considerado independente da temperatura e o valor tomado pode ser de  $\lambda_a = 45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

Pela Figura 3.3, a condutividade térmica do concreto de densidade normal ( $\lambda_{cn}$ ), em  $\text{W/m}^\circ\text{C}$ , pode ser determinada da seguinte forma:

$$\text{- para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}: \lambda_{cn} = 1,36 - 0,136 \frac{\theta_c}{100} + 0,0057 \left( \frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad (3.22)$$

onde  $\theta_c$  é a temperatura do concreto, em graus Celsius.

De forma simplificada, o valor da condutividade térmica do concreto de densidade normal pode ser considerado independente da temperatura e o valor tomado pode ser de  $\lambda_{cn} = 1,30 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

### 3.7.2 - Calor específico

Calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar de  $1^\circ\text{C}$  uma unidade de massa de um dado material. As variações do calor específico do aço e do concreto em função da temperatura são ilustradas na Figura 3.4 e na Figura 3.5, respectivamente.

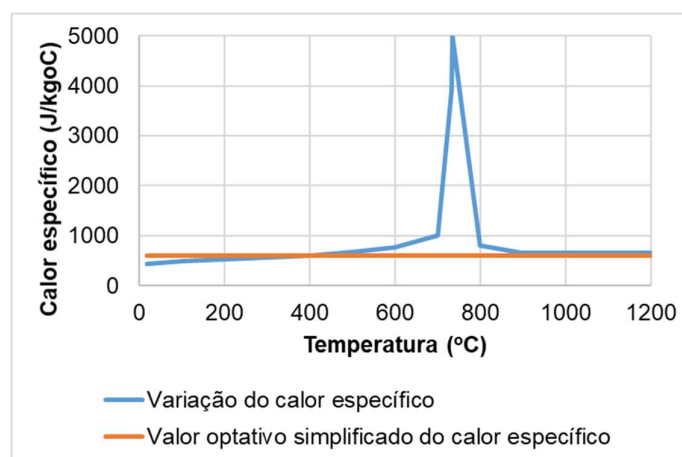


Figura 3.4: Calor específico do aço em função da temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013).

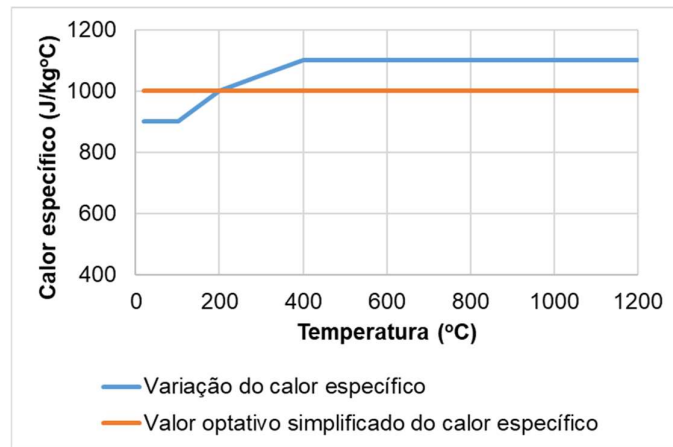


Figura 3.5: Calor específico do concreto em função da temperatura, NBR 15200 (ABNT, 2012).

Pela Figura 3.4, o calor específico do aço ( $c_a$ ), em J/kg°C, pode ser determinado da seguinte forma:

- para  $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3 \quad (3.23)$$

- para  $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$ :  $c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$  (3.24)

- para  $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$ :  $c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$  (3.25)

- para  $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$ :  $c_a = 650$  (3.26)

onde  $\theta_a$  é a temperatura do aço, em graus Celsius.

De forma simplificada, o valor do calor específico do aço pode ser considerado independente da temperatura e o valor tomado pode ser de  $c_a = 600$  J/kg°C.

Pela Figura 3.5, o calor específico do concreto de densidade normal ( $c_{cn}$ ), em J/kg°C, pode ser determinado da seguinte forma:

- para  $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C}$ :  $c_{cn} = 900$  (3.27)

- para  $100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C}$ :  $c_{cn} = 900 + (\theta - 100)$  (3.28)

- para  $200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C}$ :  $c_{cn} = 1000 + \frac{(\theta - 200)}{2}$  (3.29)

- para  $400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$ :  $c_{cn} = 1100$  (3.30)

onde  $\theta_c$  é a temperatura do concreto, em grau Celsius.



De forma simplificada, o valor do calor específico do concreto pode ser considerado independente da temperatura e o valor tomado pode ser de  $c_{cn} = 1000$  J/kg°C.

### 3.7.3 - Alongamento

O alongamento de um material é o aumento do seu comprimento, ou seja, quando ocorre uma expansão térmica provocada pelo aumento da temperatura do mesmo. As variações do alongamento do aço e do concreto em função da temperatura são ilustradas na Figura 3.6 e na Figura 3.7, respectivamente.

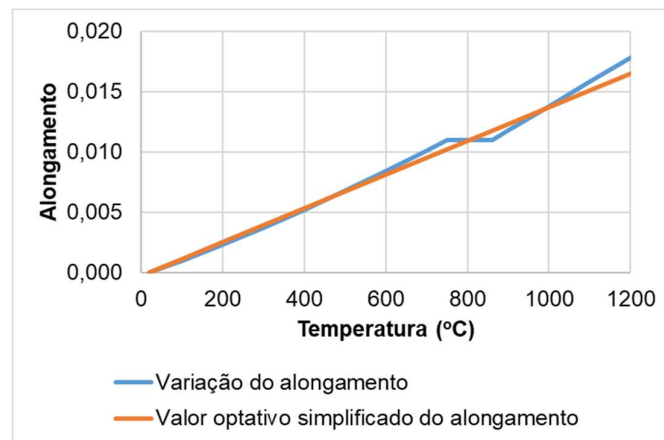


Figura 3.6: Alongamento do aço em função da temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013).

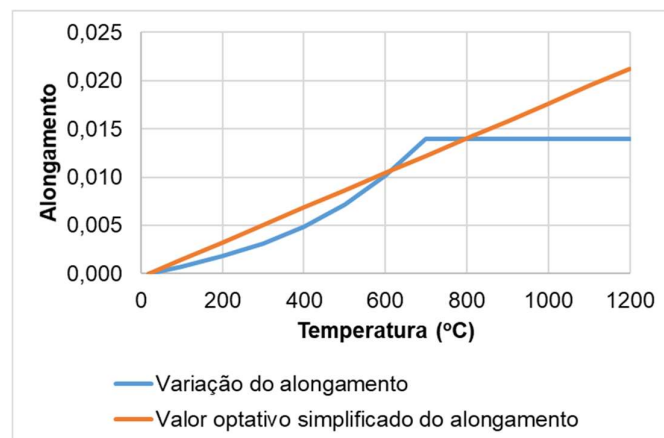


Figura 3.7: Alongamento do concreto em função da temperatura, NBR 15200 (ABNT, 2012).

Pela Figura 3.6, o alongamento do aço ( $\Delta l_a/l_a$ ) pode ser determinado da seguinte forma:

$$\text{- para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}: \frac{\Delta l_a}{l_a} = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (3.31)$$

$$\text{- para } 750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}: \frac{\Delta l_a}{l_a} = 1,1 \times 10^{-2} \quad (3.32)$$

$$\text{- para } 860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}: \frac{\Delta l_a}{l_a} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (3.33)$$

onde:

$l_a$  é o comprimento da peça de aço a  $20^\circ\text{C}$ ;

$\Delta l_a$  é o alongamento da peça de aço provocada pela temperatura;

$\theta_a$  é a temperatura do aço, em graus Celsius.

De forma simplificada, a relação entre o alongamento do aço e a temperatura pode ser considerada constante, da seguinte forma:

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (3.34)$$

Pela Figura 3.7, o alongamento do concreto de densidade normal é determinado da seguinte forma:

$$\text{- para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c < 700^\circ\text{C}: \frac{\Delta l}{l} = 9 \times 10^{-6} \theta_c + 2,3 \times 10^{-11} \theta_c^3 - 1,8 \times 10^{-4} \quad (3.35)$$

$$\text{- para } 700^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}: \frac{\Delta l}{l} = 14 \times 10^{-3} \quad (3.36)$$

onde:

$l$  é o comprimento da peça de concreto de densidade normal a  $20^\circ\text{C}$ ;

$\Delta l$  é o alongamento do elemento concreto de densidade normal provocado pela temperatura;

$\theta_c$  é a temperatura do concreto, em  $^\circ\text{C}$ .

De forma simplificada, a relação entre o alongamento do concreto de densidade normal e a temperatura pode ser considerada constante, da seguinte forma:

$$\frac{\Delta l}{l} = 18 \times 10^{-6} (\theta_c - 20) \quad (3.37)$$

### 3.8 - Proteção passiva contra incêndio

Para evitar o colapso prematuro de um elemento estrutural ou de suas ligações em aço em situação de incêndio, faz-se o dimensionamento da estrutura para resistir a temperaturas elevadas ou, como procedimento alternativo, faz-se uso de materiais que, ao envolverem os elementos constituintes das estruturas de interesse, atuam como proteção contra o fogo.

As medidas de segurança de proteção contra incêndio podem se classificar em ativas e passivas. A proteção ativa é constituída de medidas de combate a incêndio compostas basicamente pelas instalações prediais de proteção contra incêndio, como extintores, hidrantes, sprinklers, etc. A proteção passiva não tem como objetivo impedir que o incêndio ocorra, mas impede a sua propagação. Essa proteção é uma solução incorporada ao sistema construtivo de uma edificação, formada pelo conjunto de materiais isolantes térmicos, sendo o método mais adotado para evitar o aumento excessivo da temperatura nos elementos estruturais de aço. Esses materiais utilizados devem resistir ao fogo por um determinado período de tempo, ou seja, devem se manter íntegros durante a evolução do incêndio, sem apresentar fissuras. Por outro lado, a utilização de materiais isolantes implica em alguns efeitos indesejáveis. A utilização da camada de isolamento térmico pode onerar em cerca de 10 a 30% o custo total da estrutura metálica utilizada, reduzindo a competitividade da construção metálica.

As propriedades térmicas e mecânicas dos materiais de proteção contra incêndio devem ser determinadas por ensaios realizados em laboratório nacional ou laboratório estrangeiro, de acordo com a norma NBR 5628 (ABNT, 2001) ou de acordo com outra Norma Brasileira ou, ainda, de acordo com norma ou especificação estrangeira. Em relação aos materiais comercializados atualmente, muitos fabricantes não apresentam em seus catálogos, de maneira satisfatória, as propriedades de seus materiais. Apenas como referência, apresenta-se na Tabela 3.3 as propriedades de alguns dos materiais mais comuns empregados como proteção contra fogo.

Tabela 3.3: Propriedades dos principais materiais de proteção contra fogo (VILA REAL, 2003 apud REGOBELLO, 2007).

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA kg/m <sup>3</sup>	TEOR DE UMIDADE %	CONDUTIVIDADE TÉRMICA W/m°C	CALOR ESPECÍFICO J/kg°C
MATERIAIS PROJETADOS				
fibra mineral	300	1	0,12	1200
argamassa de vermiculita	350	15	0,12	1200
perlita	350	15	0,12	1200
MATERIAIS PROJETADOS DE ALTA DENSIDADE				
Vermiculita (ou perlita) e cimento	550	15	0,12	1100
Vermiculita (ou perlita) e gesso	650	15	0,12	1100
PLACAS				
Vermiculita (ou perlita) e cimento	800	15	0,20	1200
Silicato fibroso	600	3	0,15	1200
Fibrocimento	800	5	0,15	1200
Placas de gesso	600	20	0,20	1700
PLACAS DE FIBRA COMPACTADA				
Silicato fibroso, lã mineral, lã de rocha	150	2	0,20	1200
Concreto	2300	4	1,60	1000
Concreto leve	1600	5	0,80	840
Blocos de concreto	2200	8	1,00	1200
Tijolo cerâmico vazado	1000	-	0,40	1200
Tijolo cerâmico maciço	2000	-	1,20	1200

É necessário realizar uma análise em cada situação, considerando o tipo de edificação, para fazer a escolha correta do material a ser utilizado, garantindo a segurança que oferecem.

Os revestimentos térmicos podem ser classificados quanto à morfologia, existindo o revestimento do tipo contorno, quando o material de revestimento contra fogo contorna o perímetro da seção transversal do elemento, e do tipo caixa (com ou sem vãos), quando o material de revestimento envolve como caixa a seção transversal do elemento, como ilustra a Figura 3.8.

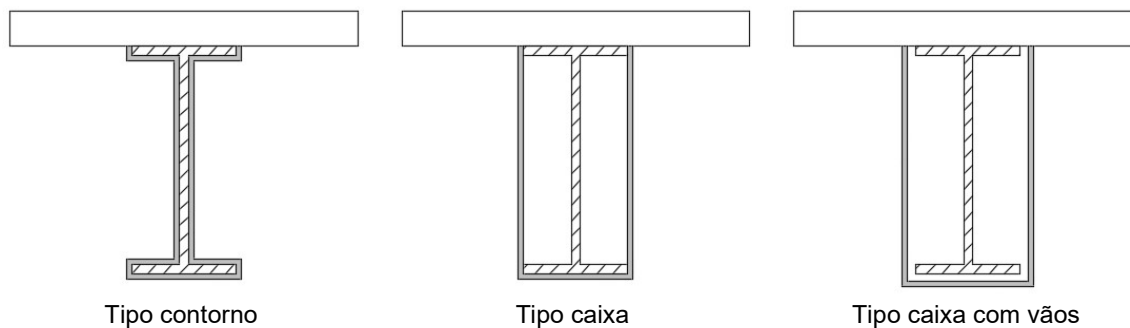


Figura 3.8: Revestimentos térmicos do tipo contorno e do tipo caixa para vigas mistas.

Os materiais para revestimento térmico devem apresentar capacidade de proteção térmica para altas temperaturas, mantendo sua integridade durante o incêndio, sem causar aumento considerável no peso próprio na estrutura. Para isso, é necessário que eles apresentem, em geral, baixa massa específica aparente, baixa condutividade térmica e calor específico elevado. Esses materiais devem trabalhar acompanhando os deslocamentos do elemento estrutural e a durabilidade do material deve ser compatível com a vida útil da estrutura. Não deve ser higroscópico, de modo a garantir que o aço não receba umidade; porém, é necessário o uso de *primers* ou de outros produtos anticorrosivos nas estruturas internas para não agravar a corrosão. Esses materiais de proteção térmica são classificados de acordo com o material constituinte e com a técnica de colocação. Quanto ao material constituinte, podem ser citadas as proteções clássicas, argamassas projetadas, materiais pré-fabricados e tintas intumescentes. Quanto à técnica de colocação, geralmente as proteções térmicas são moldadas com fôrmas, aplicadas manualmente, aplicadas por jateamento, fixadas por dispositivos apropriados ou montadas.

### 3.8.1 - Proteções clássicas

As proteções clássicas de estruturas de aço são aquelas feitas por meio de materiais já utilizados na construção civil, como o enclausuramento de vigas e pilares em concreto, como ilustra a Figura 3.9. Esta solução proporciona proteção ao aço frente à corrosão e incêndio ao mesmo tempo. Algum reforço é adicionado ao sistema, na forma de vergalhões, para manter o concreto no local durante o incêndio. Hoje em dia, tais métodos tornaram-se pouco usados, especialmente no que se referem às vigas, devido ao grande tempo gasto na execução dessas proteções e ao aumento de peso próprio da construção.

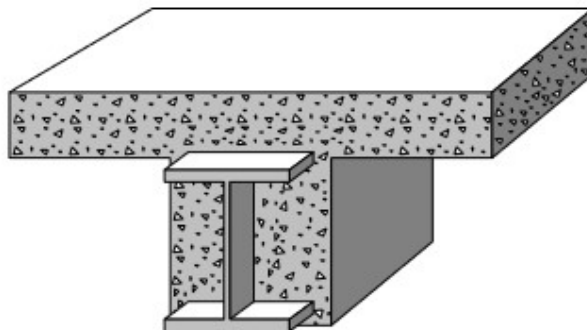


Figura 3.9: Enclausramento em concreto da viga de aço (RIBEIRO, 2004).

### 3.8.2 - Argamassas projetadas

As argamassas projetadas são aplicadas por jateamento direto sobre a superfície de aço e, após sua secagem, trabalham monoliticamente com a estrutura, acompanhando seus movimentos, sem a ocorrência de fissuras ou desprendimento. São mais apropriadas para ambientes menos exigentes e para elementos acima de forros, pois o resultado da aplicação não se apresenta com acabamento, como ilustra a Figura 3.10.



Figura 3.10: Viga mista revestida por argamassa projetada (PANNONI, 2017)

Este tipo de material consiste numa proteção tipo contorno, pois é aplicada ao longo do perímetro do perfil. A vantagem deste tipo de sistema é o menor custo. Dentre as desvantagens, podem ser citados o tempo de secagem do material, sua pequena aderência, dificuldade de realização de pintura, muita produção de sujeira e superfície rugosa.

No Brasil, as argamassas são encontradas apenas de três formas diferentes, listadas a seguir:

- Argamassas cimentícias: compostas por materiais aglomerantes, como gesso e cimento, em grande quantidade, e resinas acrílicas. As composições dos aglomerantes variam de acordo com a sua utilização, variando-se, assim, o peso específico do material;
- Fibra projetada: são produtos de baixa e média densidades, contendo, basicamente, fibras, que possuem propriedades isolantes, obtidas a partir de rocha basáltica como principal ingrediente. Estas fibras são misturadas com escória de alto-forno para criar uma mistura de baixa densidade;
- Argamassa à base de vermiculita: produto de baixa densidade, composto, basicamente, de vermiculita expandida, cimento Portland e aglomerados minerais.

### **3.8.3 - Materiais pré-fabricados**

Os materiais pré-fabricados são elementos rígidos ou flexíveis, fixados à estrutura metálica por meio de pinos ou perfis leves de aço, proporcionando diversas possibilidades de acabamento. As placas consistem numa proteção tipo caixa e isso exige cuidados especiais nas ligações das placas umas às outras e ao elemento a revestir, para impedir a passagem dos gases pelas juntas. É um tipo de sistema que se torna muito econômico quando utilizado em superfícies planas. Como desvantagens, destacam-se a aplicação lenta e a exigência de pinos para sua fixação nas superfícies. Alguns tipos de elementos pré-fabricados encontrados no mercado brasileiro são:

- Placas de gesso acartonado: são elementos rígidos, como ilustra a Figura 3.11, constituídos de fibra de vidro, e, em alguns casos, de vermiculita;
- Placas de lã de rocha: são painéis de baixa densidade, rígidos ou flexíveis, feitos de materiais fibrosos, aglomerados pela adição de resinas termo-endurecíveis. A matéria-prima básica utilizada na confecção das placas é o basalto. São fixadas com pinos de aço soldados à estrutura metálica;
- Painéis de silicato autoclavados: constituídos por placas rígidas que apresentam elevada resistência mecânica e à abrasão;
- Mantas: são flexíveis e formadas a partir de fibras silico-aluminosas, presas à estrutura através da utilização de pinos de aço soldados na estrutura. As fibras que a compõem são multidirecionais e entrelaçadas por um processo contínuo de agulhamento, conferindo às mantas boa resistência ao manuseio e à erosão.

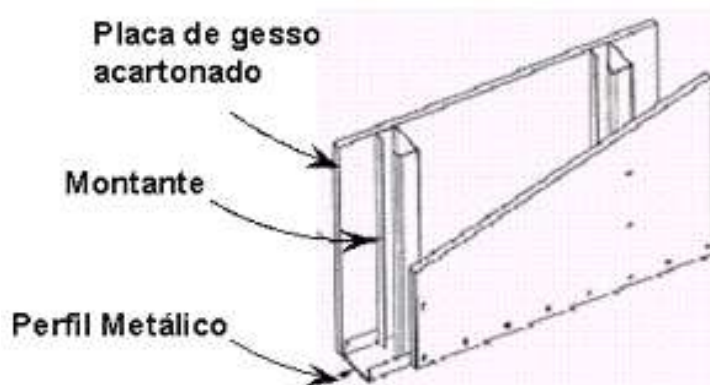


Figura 3.11: Placa de gesso acartonado revestindo o perfil metálico (PANNONI, 2017)

### 3.8.4 - Tintas intumescentes

Tintas intumescentes são tintas especiais constituídas por polímeros com pigmentos intumescentes, cuja película fina, a partir de 200°C, intumesce (aumenta de volume), formando uma espuma rígida que protege eficientemente o aço contra o fogo e os gases quentes, como pode ser observado na Figura 3.12. O sistema intumescente é constituído, basicamente, pelo *primer* epoxídico, de alto desempenho; pela pintura intumescente, que oferece a característica intumescente; e pela tinta de acabamento, que proporciona efeito decorativo na cor especificada pelo usuário. É aplicado na superfície do aço por meio de pincel, rolo ou spray. O sistema intumescente oferece uma aparência estética final muito boa, e pode ser utilizado nos ambientes mais exigentes. Estes produtos, geralmente, são degradáveis na presença de água, necessitando de uma pintura de base e de acabamento compatíveis com a tinta intumescente quando utilizados para revestir superfícies de estruturas de aço sujeitas à ação de intemperismo. Estas tintas intumescentes possuem facilidade de aplicação e constituem um revestimento que apresenta maior limpeza na aplicação. No entanto, possuem desvantagens, como sua aplicação lenta e seu elevado preço.



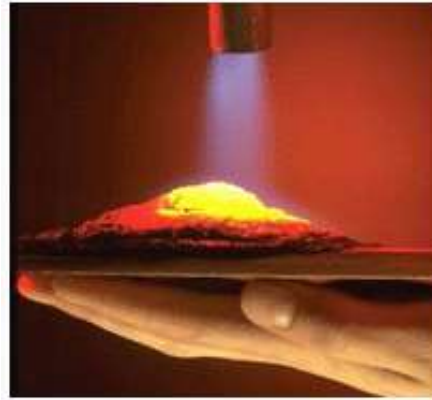


Figura 3.12: Formação da espuma rígida nas tintas intumescentes (PANNONI, 2017)

### 3.9 - Método simplificado de dimensionamento de vigas mistas aço-concreto

A norma NBR 14323 (ABNT, 2013) propõe um método simplificado de cálculo que tem como função a determinação da ação térmica e o dimensionamento dos diversos elementos que constituem a edificação, inclusive vigas mistas aço-concreto, em situação de incêndio.

O processo de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio de um membro estrutural consiste no modelo de incêndio, na análise térmica e na análise estrutural. O modelo do incêndio tenta reproduzir o cenário do incêndio por meio de curvas “Temperatura x Tempo”. A análise térmica corresponde à etapa da transferência de calor entre os gases quentes do incêndio e o membro estrutural. Nessa situação, a estrutura absorve calor e sofre uma elevação de temperatura; no entanto, sua geometria (fator de massividade) e propriedades térmicas influenciam na taxa com que o calor é absorvido. A análise estrutural procura determinar a capacidade resistente da estrutura em função da temperatura em que o membro estrutural se encontra. O esforço resistente (momento fletor, esforço normal, etc) é calculado de acordo com o estado limite último admitido em situação de incêndio, considerando a redução da resistência e da rigidez da estrutura em virtude da perda das propriedades mecânicas do aço e do concreto sob altas temperaturas. Por fim, devem ser verificadas as condições de segurança que o elemento estrutural deve atender quando se encontra em situação de incêndio.

### 3.9.1 - Incêndio-padrão

O modelo de incêndio tem como objetivo reproduzir o cenário do incêndio e determinar a evolução da temperatura do ar no compartimento em chamas.

A variação da temperatura dos gases ao longo do tempo, esquematizada na Figura 3.13 (a), é denominada curva “Temperatura x Tempo” representativa de uma situação de um “Incêndio-Real” de um ambiente sujeito à situação de incêndio. Na fase inicial, o incêndio é de pequenas proporções e é geralmente negligenciado, muito embora seja um estágio crítico para a vida humana, pois há liberação de gases tóxicos e a temperatura no compartimento pode alcançar 100°C ou mais. Em termos de análise estrutural, a fase mais significativa é após o início da inflamação, que corresponde ao pior estágio da evolução do incêndio no compartimento, pois o incêndio encontra-se totalmente desenvolvido.

Para fins de dimensionamento, passa a ser utilizada a curva da Figura 3.13 (b), denominada curva “Temperatura x Tempo” representativa de uma situação de um incêndio denominado “Incêndio-Natural”, em que a fase inicial é desconsiderada e a fase de resfriamento é ajustada por uma reta. No entanto, a curva da Figura 3.13 (b) depende de fatores relacionados ao ambiente em chamas, como carga de incêndio (material combustível), grau de ventilação, compartimentação, entre outros. Por essa razão, a norma NBR 14323 (ABNT, 2013) menciona que, para a determinação da temperatura a ser usada no dimensionamento em situação de incêndio, pode ser usada a curva “Temperatura x Tempo” dos gases quentes padronizada pela norma NBR 5628 (ABNT, 2001), denominada “Incêndio-Padrão”, juntamente com o TRRF (tempo requerido de resistência ao fogo) obtido com o uso da norma NBR 14432 (ABNT, 2001).

Embora não represente o desenvolvimento de um incêndio real, convencionou-se adotar a curva de “Incêndio-Padrão” como modelo para análise experimental de estruturas, de materiais de proteção térmica, de portas corta-fogo, etc.

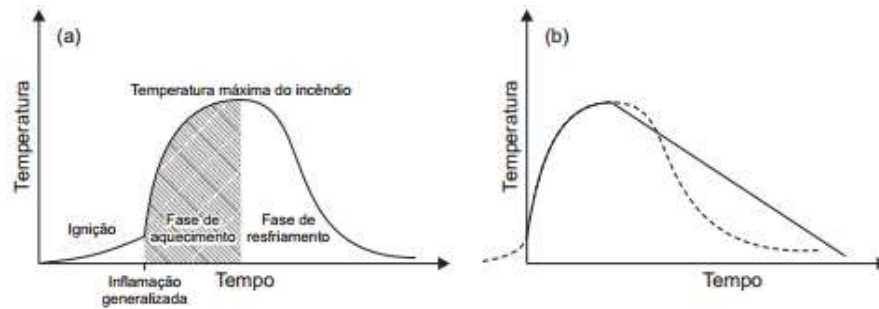


Figura 3.13: Curvas "Temperatura x Tempo": (a) de um "Incêndio-Real" e (b) de um "Incêndio-Natural" (SILVA, 2001 apud KIRCHHOF, 2004).

A norma NBR 5628 (ABNT, 2001) recomenda o uso da seguinte expressão para determinação da curva temperatura-tempo do "Incêndio-Padrão":

$$T = T_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (3.38)$$

sendo  $T$  a temperatura dos gases no ambiente em chamas ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_0$  a temperatura dos gases no instante  $t = 0$ , geralmente admitida entre  $10^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$ , e  $t$  o tempo em minutos. A Figura 3.14 mostra a representação gráfica da curva do "Incêndio-Padrão".

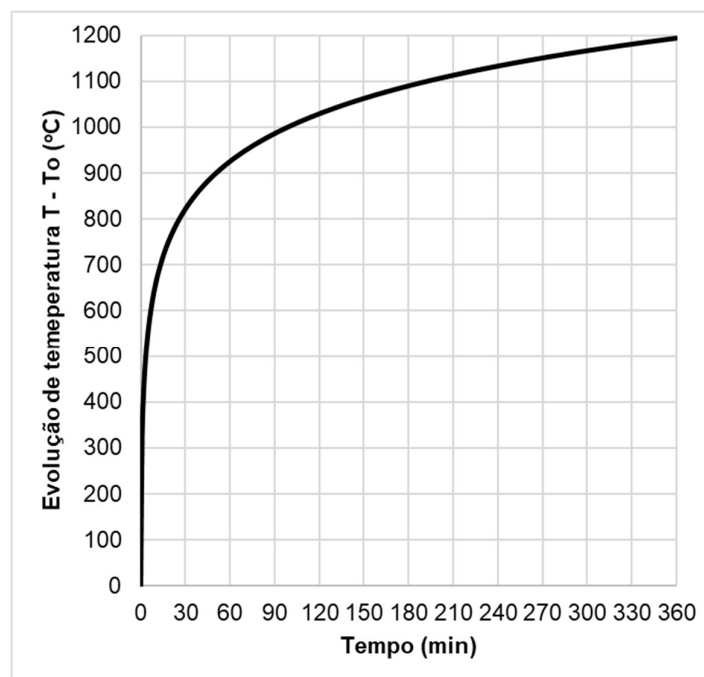


Figura 3.14: Representação gráfica da curva do "Incêndio-padrão", NBR 5628 (ABNT, 2001).

Pode-se observar que a característica principal desta curva é a de possuir apenas um ramo ascendente; logo, admite-se que a temperatura dos gases seja sempre crescente com o tempo.

### 3.9.2 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), de acordo com a norma NBR 14432 (ABNT, 2001), é o tempo mínimo que um elemento construtivo deve resistir ao fogo quando sujeito ao incêndio-padrão. O TRRF é determinado em função de aspectos como o tipo de ocupação, a área e a altura da edificação, podendo variar de 30 a 120 minutos. O parâmetro TRRF deve garantir a saída dos ocupantes da edificação, a segurança das operações de combate a incêndio e a minimização de danos às edificações adjacentes.

Vale ressaltar que, para edificações de pequeno porte ou de fácil desocupação, pode-se dispensar a verificação da segurança estrutural em situação de incêndio, exceto quando solicitada pelo proprietário. Já para edificações de difícil desocupação, como edifícios de andares múltiplos, a segurança estrutural com relação à situação de incêndio deverá ser considerada. A Tabela 3.4 contém informações referentes às edificações, segundo a norma NBR 14432 (ABNT, 2001), isentas de verificação em situação de incêndio.

Tabela 3.4: Edificações consideradas isentas de verificação estrutural em incêndio (SILVA, 2000 apud KIRCHHOFF, 2004).

Área (m <sup>2</sup> )	Ocupação	Carga de incêndio específica (MJ/m <sup>2</sup> )	Altura (m)
≤ 750	Qualquer	Qualquer	Qualquer
≤ 1500	Qualquer	≤ 1000	≤ 2 pavimentos
Qualquer	Centros esportivos, terminais de passageiros (1)	Qualquer	≤ 23
Qualquer	Garagens abertas (2)	Qualquer	≤ 30
Qualquer	Depósitos (3)	Baixa	≤ 30
Qualquer	Qualquer	≤ 500	Térrea
Qualquer	Industrial (4)	≤ 1200	Térrea
Qualquer	Depósitos (4)	≤ 2000	Térrea
Qualquer	Qualquer (5)	Qualquer	Térrea
≤ 5000	Qualquer (6)	Qualquer	Térrea

Observações:

(1) Centros esportivos, terminais de passageiros e construções provisórias, para 23 m < h ≤ 30 m e h > 30 m o TRRF deverá ser 30 e 60 minutos, respectivamente, e para subsolo com h ≤ 10 m e h > 10 m, o TRRF deverá ser de 60 e 90 minutos, respectivamente.

(2) Garagens abertas lateralmente, com estrutura de concreto armado ou protendido ou em aço, atendendo às condições construtivas da NBR 14432:2001.

(3) Depósitos sem risco de incêndio expressivo, com estrutura em concreto armado ou protendido ou em aço.

(4) Observados os critérios de compartimentação constantes das normas em vigor ou, na sua falta, de regulamentos de órgãos públicos.

(5) Utilizando chuveiros automáticos, conforme outras normas brasileiras.

(6) Com pelo menos duas fachadas de aproximação perfazendo, no mínimo, 50% do perímetro.

### 3.9.3 - Método simplificado de análise térmica

O método simplificado de análise térmica, proposto pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013), é aplicável aos elementos estruturais de aço com e sem material de proteção térmica, situados no interior da edificação, totalmente imersos no compartimento em chamas.

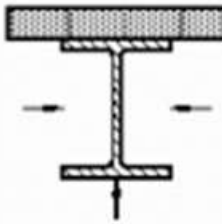
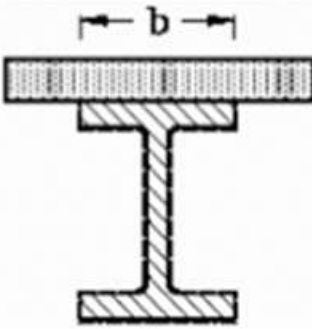
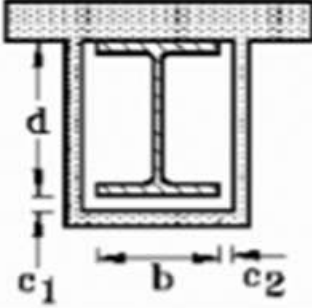
#### 3.9.3.1 - Fator de massividade

De acordo com a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), o índice de aumento de temperatura de um elemento estrutural de aço em incêndio é proporcional ao seu fator de massividade  $u/A_g$ , para elementos sem proteção, ou  $u_m/A_g$ , para elementos recobertos com material de proteção contra incêndio, onde:  $u$  é o perímetro do elemento estrutural de aço exposto ao incêndio;  $u_m$  é o perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio;  $A_g$  é a área da seção transversal do elemento estrutural de aço. Deve-se utilizar a área bruta da seção transversal para determinar o fator de massividade e o efeito de pequenos furos pode ser desprezado.

Diante disso, o fator de massividade pode ser interpretado como um índice que avalia a velocidade de aquecimento de um elemento estrutural quando exposto ao fogo. Isto significa que, para perfis de mesma área ou massa específica linear (kg/m), aquele com menor perímetro exposto ao fogo irá aquecer-se mais lentamente do que os demais. Analogamente, entre os perfis com mesmo perímetro exposto ao fogo, aquele com maior área ou massa específica linear (kg/m) irá aquecer-se mais lentamente que os outros.

A Tabela 3.5 mostra o fator de massividade para o caso específico da viga mista aço-concreto com e sem material de proteção térmica, conforme a norma NBR 14323 (ABNT, 2013).

Tabela 3.5: Fator de massividade para vigas mistas sem e com proteção, NBR 14323 (ABNT, 2013).

SITUAÇÃO	DESCRIÇÃO	FATOR DE MASSIVIDADE
	Seção aberta exposta ao incêndio por três lados sem material de proteção passiva	$\frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$
	Seção com revestimento tipo contorno de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço} - b}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Seção com revestimento tipo caixa de espessura uniforme, exposta ao incêndio por três lados (Obs.: válido apenas para $c_1$ e $c_2$ inferiores ou iguais a $d/4$ )	$\frac{2d + b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

### 3.9.3.2 - Elementos estruturais sem proteção térmica

O aumento da temperatura da estrutura é provocado pelo fluxo de calor, por convecção e radiação, devido à diferença de temperatura entre os gases quentes do incêndio e o perfil de aço.

De acordo com a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), para uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, a elevação de temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$ , em grau Celsius, de um elemento estrutural de aço sem proteção contra incêndio durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  pode ser determinada por:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{(u/A_g)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (3.39)$$

onde:

$k_{sh}$  é um fator de correção para o efeito de sombreamento;

$u$  é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço, em m;

$A_g$  é a área da seção transversal do elemento estrutural, em m<sup>2</sup>;

$u/A_g$  é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem proteção contra incêndio, em m<sup>-1</sup>;

$\rho_a$  é a massa específica do aço, em kg/m<sup>3</sup>;

$c_a$  é o calor específico do aço, em J/kg.°C;

$\varphi$  é o valor do fluxo de calor por unidade de área, em W/m<sup>2</sup>;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo, em s, e não pode ser tomado maior que 5 s.

O efeito de sombra é causado pela obstrução local à radiação térmica devido ao formato do perfil de aço. Em seções I ou H expostas ao incêndio-padrão, o valor do fator de correção para o efeito de sombreamento  $k_{sh}$  é dado por:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} \quad (3.40)$$

onde  $(u/A_g)_b$  é o valor do fator de massividade, definido como a relação entre o perímetro exposto ao incêndio de uma caixa hipotética que envolve o perfil e a área da seção transversal do perfil (em uma seção I ou H com altura  $d$  e largura das mesas  $b$ , exposta ao incêndio pelos quatro lados, o perímetro é igual a  $2(b + d)$  e, se a seção for exposta ao incêndio pelo lado inferior e pelas laterais, o perímetro é igual a  $2d + b$ ).

Em seções transversais fechadas, como as seções-caixão e tubulares, circulares e retangulares, e seções sólidas, como as retangulares, totalmente expostas ao incêndio,  $k_{sh}$  é igual a 1,0.

O valor do fluxo de calor  $\varphi$ , em W/m<sup>2</sup>, é dado por:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (3.41)$$

com

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (3.42)$$

e

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} \left[ (\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right] \quad (3.43)$$

onde:

$\varphi_c$  é o componente do fluxo de calor devido à convecção, em W/m<sup>2</sup>;

$\varphi_r$  é o componente do fluxo de calor devido à radiação, em W/m<sup>2</sup>;

$\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção, podendo ser tomado para efeitos práticos igual a 25 W/m<sup>2</sup> °C, no caso de exposição ao incêndio-padrão, ou 35 W/m<sup>2</sup> °C, para incêndio natural;

$\theta_g$  é a temperatura dos gases quentes do incêndio, em °C;

$\theta_a$  é a temperatura na superfície do aço exposto ao fogo, em °C;

$\varepsilon_{res}$  é a emissividade resultante, podendo ser tomada para efeitos práticos igual a 0,7.

O valor do fator de massividade  $u/A_g$  não pode ser tomado como menor que 10 m<sup>-1</sup>.

### 3.9.3.3 - Elementos estruturais com proteção térmica

Nos elementos protegidos com revestimento térmico, o calor que chega ao metal depende da condução através do material de proteção, diferentemente do que ocorre nos elementos sem proteção, nos quais o calor é transmitido por convecção e radiação. As propriedades do material de proteção contra incêndio, como o calor específico, a massa específica, a condutividade térmica e a espessura do revestimento, influenciam no calor que é transferido à peça de aço dos elementos estruturais protegidos.

De acordo com a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), para uma distribuição uniforme de temperatura na seção transversal, a elevação de temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$  de um elemento estrutural envolvido por um material de proteção contra incêndio, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , pode ser determinada por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m(u_m/A_g)}{t_m\rho_a c_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + (\xi/4)} \Delta t - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{(\xi/4) + 1}, \text{ mas } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ se } \Delta\theta_{g,t} > 0 \quad (3.44)$$

com

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m (u_m/A_g) \quad (3.45)$$

onde:

$u_m$  é o perímetro efetivo do material de proteção contra incêndio, igual ao perímetro da face interna do material de revestimento, limitado às dimensões do elemento estrutural de aço, em m;



$A_g$  é a área da seção transversal do elemento estrutural, em  $m^2$ ;

$u_m/A_g$  é o fator de massividade para elementos estruturais envolvidos por material de proteção contra incêndio, por m;

$c_a$  é o calor específico do aço, em  $J/kg.°C$ ;

$c_m$  é o calor específico do material de proteção incêndio, em  $J/kg.°C$ ;

$t_m$  é a espessura do material de proteção contra incêndio, em m;

$\theta_{a,t}$  é a temperatura do aço no tempo t, em  $°C$ ;

$\theta_{g,t}$  é a temperatura dos gases no tempo t, em  $°C$ ;

$\lambda_m$  é a condutividade térmica do material de proteção contra incêndio, em  $Wm^2.°C$ ;

$\rho_a$  é a massa específica do aço, em  $kg/m^3$ ;

$\rho_m$  é a massa específica do material de proteção contra incêndio, em  $kg/m^3$ ;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo, em s, e não pode ser tomado maior que 30 segundos.

Este processo não pode ser aplicado quando o material de revestimento contra fogo é uma tinta intumescente ou algum material que apresente comportamento similar ao destas tintas em situação de incêndio.

### 3.9.3.4 - O caso particular da viga mista

Conforme a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), para vigas mistas aço-concreto, quando o componente de aço em perfil I não for envolvido por material de proteção contra incêndio ou possuir proteção tipo contorno, a distribuição de temperatura no mesmo deve ser tomada como não uniforme. Neste caso, a seção transversal é dividida em três partes (mesa inferior, alma e mesa superior), como mostrado na Figura 3.15, e se considera que não ocorre transferência de calor entre estas partes e nem entre a mesa superior e a laje de concreto. O acréscimo de temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$  das mesas inferior e superior da viga de aço durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  deve ser determinado conforme os itens 3.9.3.2 ou 3.9.3.3, respectivamente, se o perfil de aço não for protegido ou tiver proteção tipo contorno, com o fator de massividade  $u/A$  ou  $u_m/A$  calculado como se segue:

- para a mesa inferior:  $2(b_{fi} + t_{fi}) / b_{fi} t_{fi}$  (3.46)

- para a mesa superior:

- sobreposta por laje maciça:  $(b_{fs} + 2t_{fs}) / b_{fs} t_{fs}$  (3.47)

- sobreposta por laje com fôrma metálica incorporada:  $2(b_{fs} + t_{fs}) / b_{fs} t_{fs}$  (3.48)

- para a alma:  $2h/t_w$  (3.49)

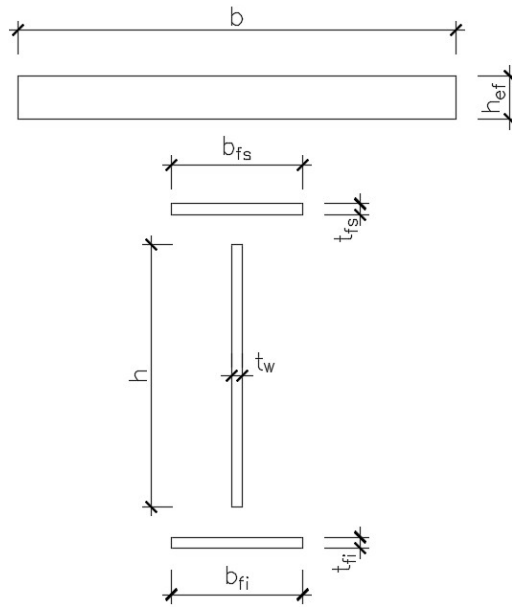


Figura 3.15: Divisão do componente de aço em perfil I para distribuição de temperatura, NBR 14323 (ABNT, 2013).

Para componentes de aço em perfil I com proteção tipo caixa, uma temperatura uniforme pode ser considerada no perfil. A elevação desta temperatura deve ser obtida conforme o item 3.9.3.3.

Ainda de acordo com a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), considera-se que a distribuição de temperatura é constante ao longo da largura efetiva  $b$  da laje de concreto e que, para concreto de densidade normal, a variação de temperatura na altura da laje pode ser obtida da Tabela 3.6, dividindo-se a altura da laje em um máximo de 14 fatias.

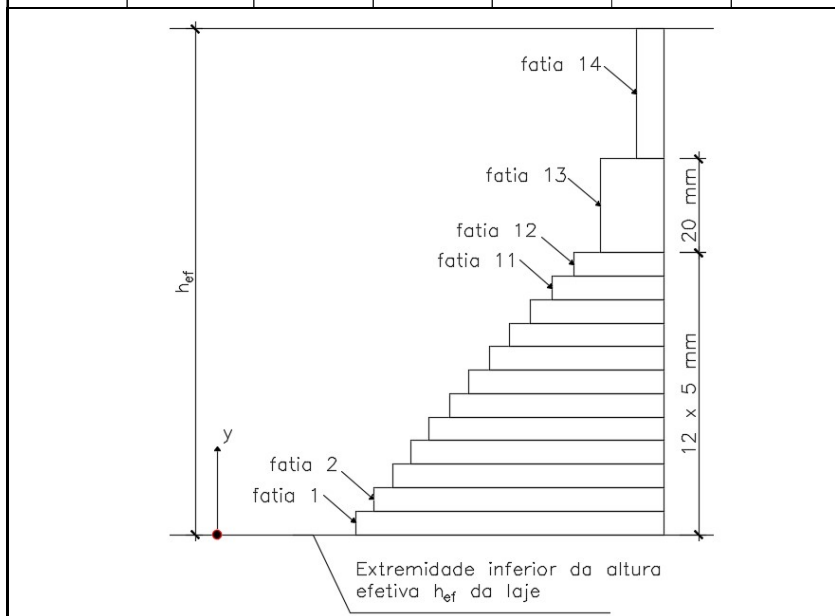
De forma simplificada, pode-se considerar a temperatura uniforme ao longo da altura da laje de concreto de densidade normal, e igual a:

$$\theta_c = \frac{1}{h_{ef}} \sum_{j=1}^n \theta_{c,j} e_j \quad (3.50)$$

onde  $n$  é o número de fatias em que a laje foi dividida;  $\theta_{c,j}$  e  $e_j$  são, respectivamente, a temperatura e a espessura de uma fatia  $j$ ; e  $h_{ef}$  é a altura efetiva igual à espessura da laje  $t_c$  no caso de laje maciça de concreto.

Tabela 3.6: Variação de temperatura na altura das lajes de concreto de densidade normal, NBR 14323 (ABNT, 2013).

FATIA	Altura (y) mm	TRRF (min)				
		30	60	90	120	180
1	0 a 5	535	705	-	-	-
2	5 a 10	470	642	738	-	-
3	10 a 15	415	581	681	754	-
4	15 a 20	350	525	627	697	-
5	20 a 25	300	469	571	642	738
6	25 a 30	250	421	519	591	689
7	30 a 35	210	374	473	542	635
8	35 a 40	180	327	428	493	590
9	40 a 45	160	289	387	454	549
10	45 a 50	140	250	345	415	508
11	50 a 55	125	200	294	369	469
12	55 a 60	110	175	271	342	430
13	60 a 80	80	140	220	270	330
14	≥ 80	60	100	160	210	260



Em relação aos conectores, a temperatura de uma ligação pode ser considerada, conservadoramente, igual à maior temperatura entre aquelas dos elementos estruturais conectados.

### 3.10 - Métodos avançados de cálculo

De acordo com a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), métodos avançados de dimensionamento são aqueles que proporcionam uma análise realística da estrutura

e do cenário de incêndio e que podem ser usados para elementos estruturais mistos. Esses métodos avançados podem incluir modelos separados para o desenvolvimento e a distribuição de temperatura nas peças estruturais (análise térmica) e para o comportamento mecânico da estrutura ou de alguma de suas partes (análise estrutural). Também podem ser usados em associação com qualquer curva de aquecimento, desde que as propriedades do material sejam conhecidas para a faixa de temperatura considerada. A análise térmica deve ser baseada em princípios reconhecidos e hipóteses da teoria da transferência de calor. O modelo de resposta térmica utilizado deve considerar as ações térmicas e a variação das propriedades térmicas dos materiais com a temperatura.

Os modelos avançados de cálculo têm como base métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno. Esses métodos são aproximações numéricas que possibilitam obter uma resposta aproximada do modelo quando um problema não possui uma solução analítica. Na análise térmica, esses métodos permitem obter o campo de temperaturas no elemento ao longo do processo de aquecimento. No entanto, devido à complexidade numérica inerente à resolução numérica, torna-se necessário o uso de computadores para o emprego desses métodos. As simulações numéricas, realizadas através de pacotes computacionais construídos com base no MEF, têm como objetivo diminuir incoerências entre situações idealizadas e reais, ou seja, representam os fenômenos reais com a maior exatidão possível. Além desses pacotes computacionais, existem programas de computador específicos para análise de transferência de calor na engenharia de incêndio. Portanto, disponibilidade, custo, interação usuário/programa e produtividade podem ser os principais fatores de decisão na aquisição de um destes programas para utilização em aplicações de dimensionamento térmico e estrutural de estruturas em situação de incêndio.

### **3.10.1 - MEF na análise de transferência de calor**

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado na busca de soluções para diversos tipos de problemas físicos na Engenharia. Seu desenvolvimento ocorreu essencialmente ligado ao advento dos computadores digitais. Para se obter a solução numérica de problemas em geral é necessário estabelecer e resolver um conjunto de equações algébricas que governam o sistema em estudo. Por meio do método dos elementos finitos, torna-se viável estabelecer e resolver as equações governantes de

problemas extremamente complexos de uma forma bastante eficaz. Além disso, muitas equações diferenciais não podem ser resolvidas analiticamente, sendo necessário, para a obtenção de suas soluções, o uso de métodos numéricos (aproximados).

O MEF consiste em um método numérico que permite a análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais ou equações integrais, com determinadas condições de contorno (Problemas de Valor de Contorno), e possivelmente com condições iniciais (para problemas variáveis no tempo). Considera-se o domínio do problema dividido nos chamados elementos finitos. As equações do problema são aproximadas usando-se funções de interpolação consideradas para representar as funções incógnitas em cada elemento. Monta-se um sistema de equações que permite calcular os valores das incógnitas nos pontos nodais. Em seguida, outras funções podem ser calculadas em pontos da malha. No Anexo A, são apresentadas as equações básicas e a formulação do MEF para análise de transferência de calor.

### **3.10.2 - O software ABAQUS**

O ABAQUS é um programa de Engenharia, baseado no Método dos Elementos Finitos, que permite resolver desde análises lineares relativamente simples até problemas não-lineares. Várias geometrias podem ser modeladas no ABAQUS devido à grande quantidade de tipo de elementos que ele possui. Possui uma extensa lista de modelos de materiais que podem simular o comportamento da maioria dos materiais típicos de Engenharia. O ABAQUS pode ser usado para simular problemas estruturais (tensões/deformações), transferência de calor, difusão de massa, gerenciamento térmico de componentes elétricos (análise acoplada termoelétrica), acústica, mecânica dos solos (análise acoplado a fluido-estrutura), e análise de piezelétricos.

Embora esse *software* não tenha implementações específicas para lidar com o comportamento estrutural em incêndio, os efeitos do fogo sobre uma estrutura podem ser simulados, incluindo as propriedades dos materiais a temperaturas elevadas. Dessa forma, pode ser usado também para executar a análise de transferência de calor para obter distribuições de temperatura em estruturas sob ataque de fogo. Programas comerciais como ABAQUS possuem uma grande biblioteca de elementos

finitos que permitem a obtenção de modelos eficientes e detalhados de praticamente todos os modos de comportamento estrutural e térmico envolvidos no fogo.

O ABAQUS consiste, essencialmente, em duas partes: gráfica (ABAQUS/CAE e ABAQUS/Viewer) e solver (ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit). O ABAQUS/CAE é pré e pós-processador. O ABAQUS/CAE pré-processador está estruturado em módulos, cada um definindo um aspecto lógico da sequência da modelagem. O pré-processador gera o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, as propriedades do material, as condições de fronteira, o carregamento aplicado e a malha de elementos finitos definidos pelo usuário. O programa ainda permite que o arquivo de entrada de dados seja alterado manualmente pelo usuário. O ABAQUS/Standard e o ABAQUS/Explicit resolvem computacionalmente carregamentos estáticos e dinâmicos, respetivamente. O pós-processador ABAQUS/CAE possibilita a visualização gráfica dos resultados. O ABAQUS/Viewer funciona exclusivamente como pós-processador.

## **CAPÍTULO 4 – ASPECTOS ADOTADOS NOS MODELOS DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO**

### **4.1 - Considerações iniciais**

Na Engenharia Civil, é de grande interesse a análise térmica de edifícios em situação de incêndio, pois permite observar os efeitos da elevação de temperatura numa posterior análise estrutural, para que se possa garantir a segurança de um edifício quanto ao colapso prematuro. A análise térmica de um elemento estrutural submetido a altas temperaturas corresponde à etapa da transferência de calor entre os gases quentes do incêndio e o membro estrutural. Nessa situação, a estrutura absorve calor e sofre uma elevação de temperatura, sendo a taxa com que o calor é absorvido influenciada pela geometria (fator de massividade) e propriedades térmicas. Esta análise tem por objetivo determinar a distribuição de temperatura e de outras variáveis térmicas de interesse como o campo e a evolução de temperaturas, a quantidade de calor (absorvido ou perdido), os gradientes térmicos e os fluxos térmicos. O estudo térmico geralmente tem caráter transiente, tendo em vista o fato de a temperatura de um ambiente em situação de incêndio variar com o tempo. Para os materiais aço e concreto, por exemplo, estas análises também possuem um caráter não-linear, uma vez que as propriedades desses materiais também variam de acordo com a temperatura.

Com o objetivo de observar o comportamento térmico em situação de incêndio de vigas mistas aço-concreto, foram criados modelos em diferentes situações em que se pode encontrá-las no ambiente em chamas, ou seja, com e sem revestimento térmico. As vigas mistas utilizadas neste projeto são compostas por laje de concreto, apoiada na mesa superior da viga de aço em perfil I, contendo ou não o conector de cisalhamento, como ilustra a Figura 4.1.

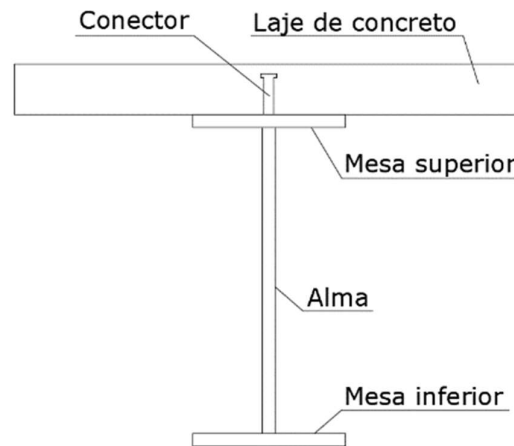


Figura 4.1: Partes que constituem a viga mista aço-concreto.

Nesta etapa, admite-se que a parte do elemento estrutural que se encontra totalmente imersa nas chamas do compartimento, ou seja, onde se localiza a viga de aço e a parte inferior da laje de concreto, é denominada de "lado exposto ao fogo", e a parte superior da laje é denominada de "lado não exposto ao fogo", onde não há incêndio e o ar encontra-se à temperatura ambiente, como ilustra a Figura 4.2.

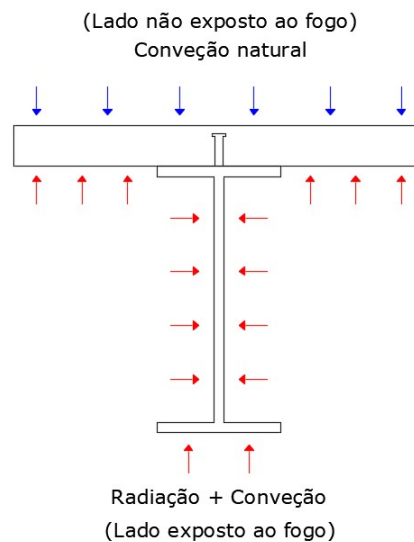


Figura 4.2: Modelo proposto para modelagem numérica da viga mista em situação de incêndio.

Os perfis metálicos utilizados são soldados, tipo viga (Série VS), com dimensões especificadas pela norma NBR 5884 (ABNT, 2013). Na Figura 4.3, estão indicadas as nomenclaturas das dimensões da viga mista e, na Tabela 4.1, estão listados os perfis escolhidos e as dimensões de cada um. Todas as lajes utilizadas nas vigas mistas possuem uma largura efetiva,  $b$ , igual a 1 m e uma altura efetiva,  $h_{ef}$ ,



igual a 0,1 m. O conector utilizado, ilustrado na Figura 4.4, é do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) e suas dimensões tem como base o conector M19 da Inox-Par.

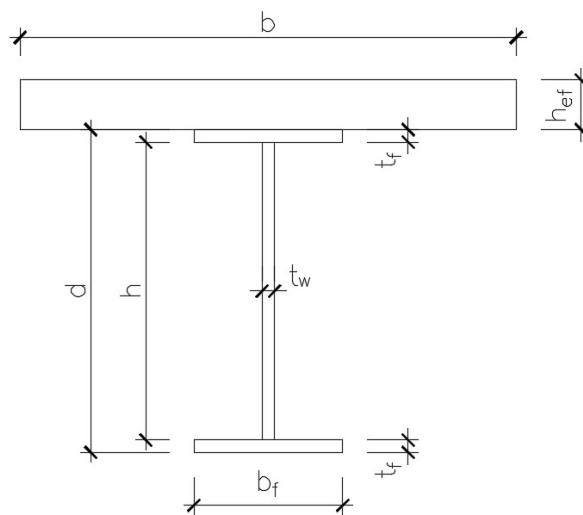


Figura 4.3: Nomenclaturas das dimensões da seção transversal da viga mista.

#### Detalhes do conector

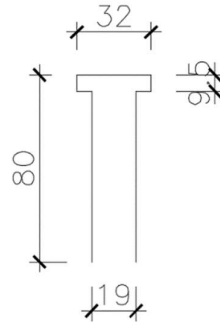


Figura 4.4: Dimensões do conector stud bolt, em mm.

Tabela 4.1: Perfis metálicos utilizados e suas dimensões, em mm.

PERFIL	Massa	Área	Altura	Alma		Mesas		u/A (m <sup>-1</sup> )*	
VS	m (kg/m)	A (cm <sup>2</sup> )	d (mm)	t <sub>w</sub> (mm)	h (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	b <sub>f</sub> (mm)		
1	350 x 42	42,2	53,72	350	4,75	331	9,5	200	240
2	650 x 155	155,4	198	650	8	600	25	300	110
3	450 x 83	83,4	106,3	450	6,3	418	16	250	154
4	500 x 97	97,4	124,11	500	6,3	462	19	250	140
5	250 x 32	32,5	41,37	250	4,75	231	9,5	160	235
6	450 x 60	60,3	76,78	450	6,3	425	12,5	200	194

\* Fator de massividade da viga mista com perfil exposto ao incêndio por três lados sem material de proteção passiva.

De forma mais detalhada, a Figura 4.5 ilustra todas as vigas mistas utilizadas neste projeto.

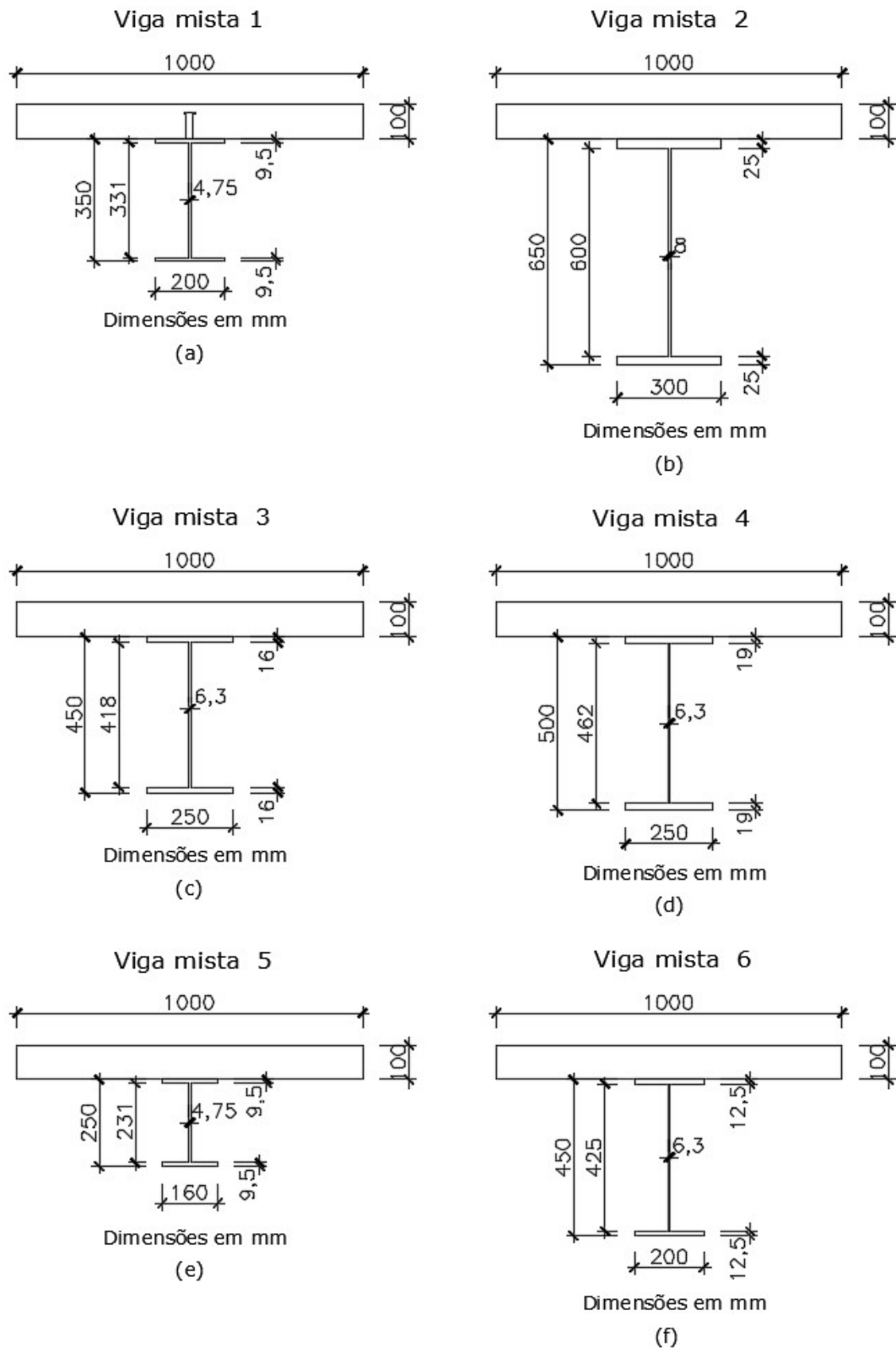


Figura 4.5: Dimensões das vigas mistas utilizadas.

Para este projeto, foram utilizadas proteções térmicas para o perfil metálico do tipo contorno e do tipo caixa (sem vãos), com espessura  $t_m$ , como ilustra a Figura 4.6.

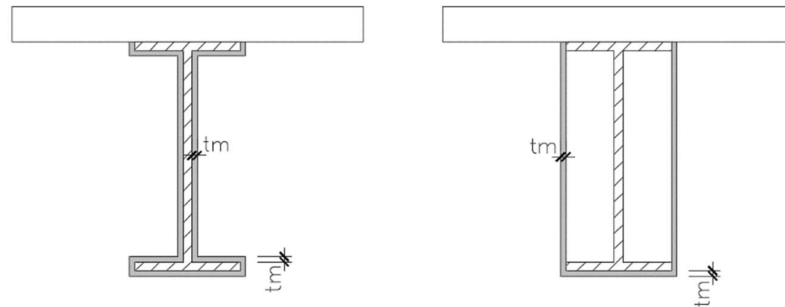


Figura 4.6: Proteção térmica: (a) tipo contorno e (b) tipo caixa.

As vigas mistas são indicadas pelo seu número seguido por siglas de acordo com suas características, da seguinte forma:

- SPC: Viga mista aço-concreto sem proteção térmica e com presença do conector *stud bolt*;
- SP: Viga mista aço-concreto sem proteção térmica e sem presença do conector *stud bolt*;
- CT: Viga mista aço-concreto com proteção térmica tipo contorno e sem presença do conector *stud bolt*;
- CX: Viga mista aço-concreto com proteção térmica tipo caixa e sem presença do conector *stud bolt*;

Em todos os modelos, a emissividade resultante,  $\epsilon_{res}$ , adotada para o aço, para o concreto e para o material de proteção, foi igual a 0,7, valor prescrito na norma NBR 14323 (ABNT, 2013), embora esta mencione esse valor apenas para a emissividade resultante do aço. O coeficiente de transferência de calor por convecção,  $\alpha_c$ , do lado exposto ao incêndio-padrão, foi tomado igual a  $25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , conforme prescrito pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013). Em relação à laje de concreto, a troca de calor entre a superfície não exposta ao incêndio e o meio foi considerada por intermédio de um coeficiente  $\alpha_c$  igual a  $9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , conforme recomendações prescritas pelo Eurocode 1 Part 1-2 (2002). Em todos os casos de vigas mistas, a temperatura inicial adotada na seção transversal foi de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , conforme prescrito pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013).

As propriedades térmicas, como o calor específico e a condutividade térmica, e a massa específica dos materiais apresentam variação com a temperatura, porém,

foram utilizados valores simplificados das propriedades do aço e do concreto, prescritos pelas normas NBR 14323 (ABNT, 2013) e NBR 15200 (ABNT, 2012), respectivamente, que independem da temperatura. As características do material de proteção térmica possuem valores semelhantes aos dos materiais comercializados atualmente. Os valores das propriedades e da espessura dos materiais aço, concreto e de proteção térmica estão indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades dos materiais aço, concreto e revestimento.

Propriedades	Material		
	Aço	Concreto	Proteção
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	7850	2400	320
Calor específico (J/kg.°C)	600	1000	1100
Condutividade térmica (W/m.°C)	45	1,30	0,135
Espessura (mm)	-	-	13

No modelo numérico da viga mista com proteção tipo caixa, foi considerado que o mecanismo de transmissão de calor que predomina no interior da cavidade é apenas a condução de calor pelo ar, diferente da consideração feita pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013), que despreza a existência do ar. Os valores das propriedades térmicas do ar estão indicados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Propriedades do ar no interior da cavidade da proteção tipo caixa, (RIBEIRO, 2004).

Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.°C)	Condutividade térmica (W/m.°C)
20	1,17	1000	0,025
100	0,94	1012	0,032
180	0,78	1025	0,038
260	0,65	1040	0,043
340	0,56	1056	0,048
420	0,50	1073	0,052
500	0,45	1090	0,056
580	0,41	1107	0,060
660	0,38	1125	0,063
740	0,35	1141	0,067
820	0,32	1158	0,071
900	0,30	1173	0,075
980	0,27	1188	0,080
1060	0,25	1201	0,086

Na determinação da temperatura das partes da viga mista aço-concreto em situação de incêndio deste projeto, foi utilizada a curva “Temperatura x Tempo” dos gases quentes, denominada “Incêndio-Padrão”, juntamente com o TRRF (tempo requerido de resistência ao fogo), conforme apresentados no Capítulo 3. O método de cálculo utilizado para a determinação das temperaturas das partes da viga mista segue o método simplificado de análise térmica proposto pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013), para vigas com e sem proteção térmica, como foi apresentado no item 3.9.3 do Capítulo 3.

#### **4.2 - Modelagem numérica no ABAQUS**

O estudo do comportamento térmico de vigas mistas em situação de incêndio por meio de simulações numéricas permite análises mais detalhadas e precisas de alguns aspectos de interesse do sistema misto, como, por exemplo, o campo e a evolução de temperaturas, os gradientes e os fluxos térmicos em determinada região.

Foram realizadas análises térmicas em seções transversais por meio da utilização do *software* ABAQUS ® versão 6.14, o qual disponibiliza ao pesquisador ferramentas necessárias para a obtenção dos resultados de interesse para essas análises. O programa permite considerar os três modos primários de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Dessa forma, são aqui propostos modelos bidimensionais de vigas mistas com o objetivo de simular satisfatoriamente seu comportamento térmico em situação de incêndio.

Os resultados obtidos por meio das simulações numéricas aqui elaboradas são comparados com resultados obtidos pelo método simplificado de cálculo apresentado na norma NBR 14323 (ABNT, 2013). Foram realizadas várias análises preliminares, alterando os diversos parâmetros envolvidos, buscando aqueles que melhor se adequam ao problema em questão. Na modelagem numérica dessas vigas mistas no ABAQUS, foi considerado que há troca de calor entre as partes do perfil metálico (mesa inferior, mesa superior e alma) e entre a mesa superior com a laje, diferentemente do que é considerado no método de análise térmica da norma NBR 14323 (ABNT, 2013).

O procedimento de resolução da modelagem numérica no *software* ABAQUS é mostrado na Figura 4.7.

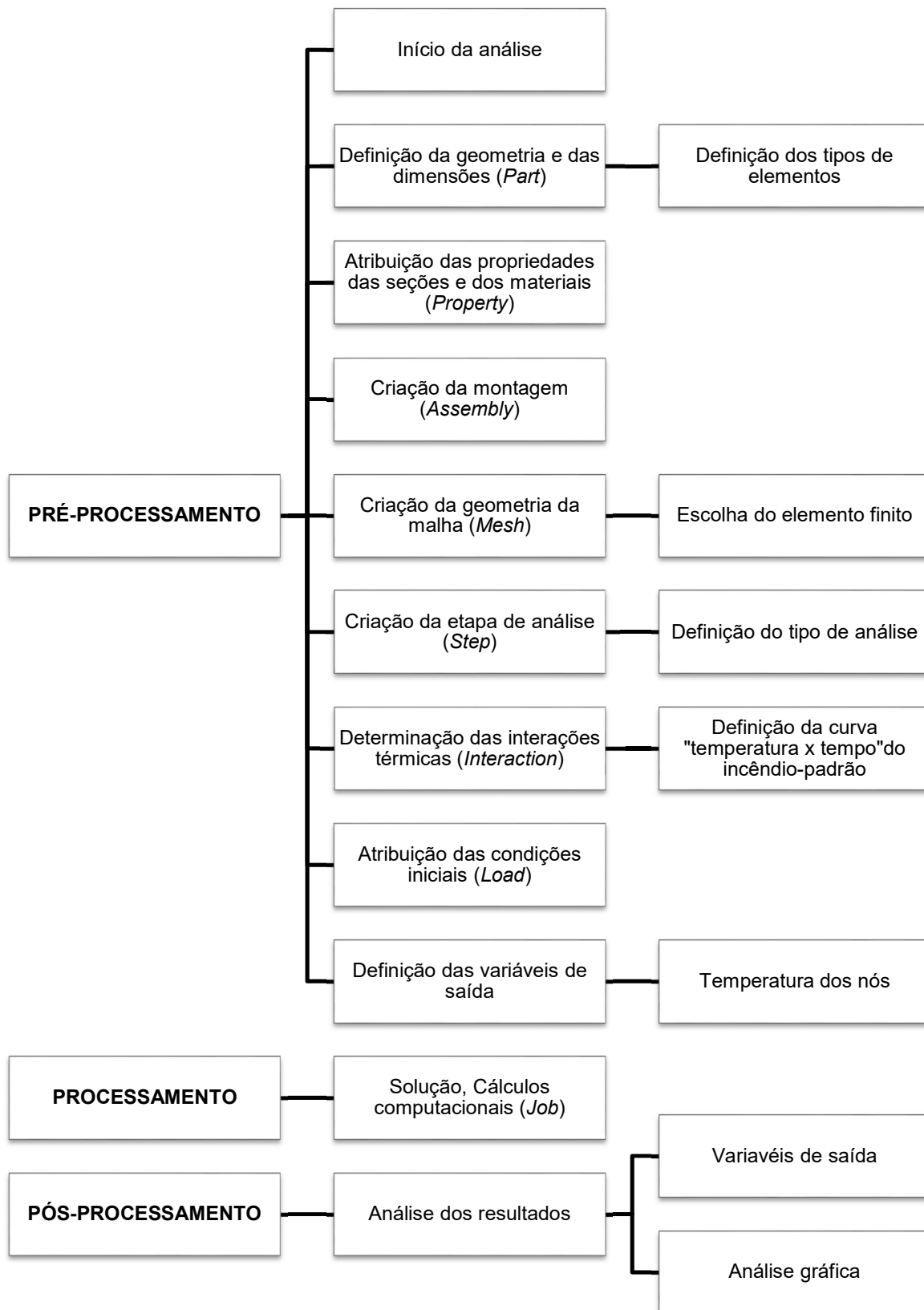
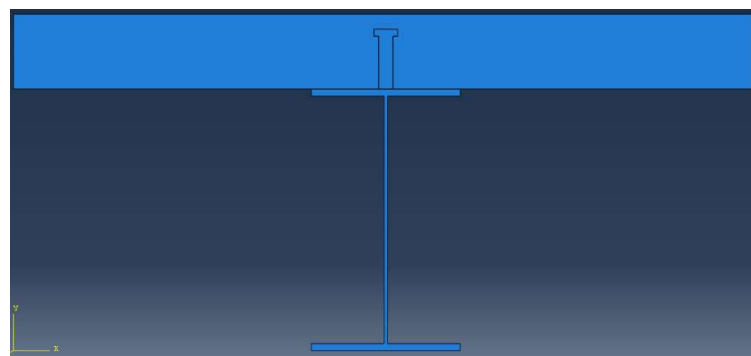
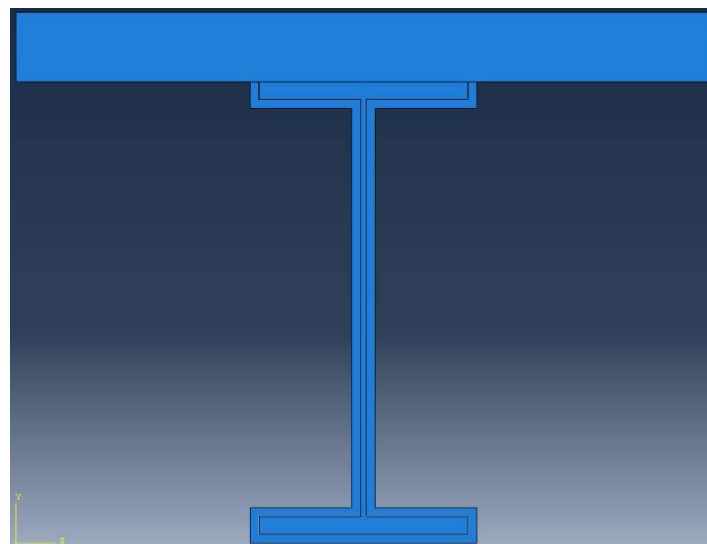


Figura 4.7: Fluxograma do procedimento de resolução da modelagem numérica no ABAQUS.

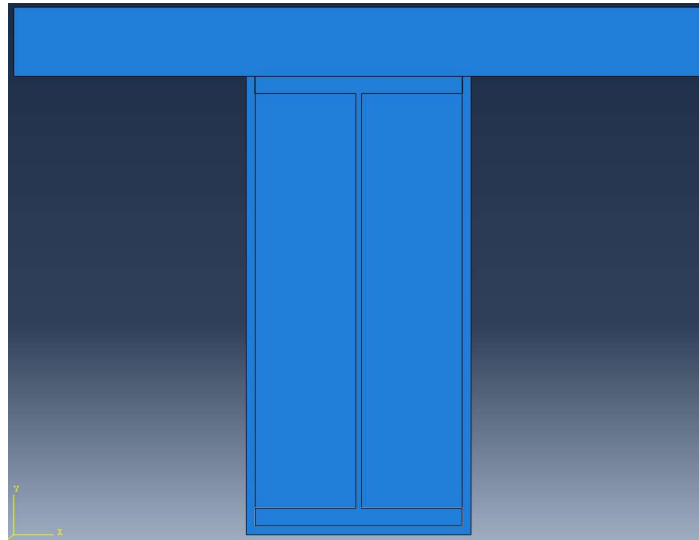
O pré-processador ABAQUS/CAE consiste de uma interface gráfica que permite ao usuário uma rápida e eficiente definição da geometria e dimensões do modelo, que são as seções transversais das vigas mistas aço-concreto com ou sem proteção térmica. Cada modelo contém suas partes, que são a viga de aço, a laje de concreto, o conector de cisalhamento, o material isolante e o ar presente no interior da cavidade da proteção tipo caixa. A definição dessas características é feita no módulo *Part*, onde é possível editar e gerir as partes do modelo em questão. Todas as partes foram definidas como deformáveis, configuradas como bidimensionais, no entanto, não foram analisadas as deformações e todos os modelos criados se comportaram como um elemento rígido. A Figura 4.8 ilustra as partes dos modelos das vigas mistas 1 (SPC), 2 (CT) e 2 (CX).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8: Partes dos modelos: (a) viga mista 1 (SPC), (b) viga mista 2 (CT) e (c) viga mista 2 (CX).

O módulo *Property* é usado para criar e editar as propriedades dos materiais aço, concreto e de proteção térmica e, também, definir e atribuir seções de cada parte da viga mista. As propriedades inseridas e atribuídas às partes estão indicadas nas Tabelas 4.2 e 4.3 deste capítulo. É possível também inserir valores das propriedades em função da temperatura atingida pelo material. Essas partes foram definidas como seções sólidas e homogêneas.

O módulo *Assembly* é usado para criar e modificar a montagem. Cada parte da viga mista foi designada como independente uma da outra, ou seja, cada parte tem o seu sistema de coordenadas, permitindo criar malhas independentes.

A escolha dos elementos finitos para a simulação numérica deve ser feita levando-se em conta vários aspectos, tais como a família à qual o elemento pertence, graus de liberdade ativos, número de nós e, principalmente, o comportamento que ele apresenta perante a análise desejada. No módulo *Mesh* é possível especificar a forma dos elementos de uma malha, bem como a técnica que o *software* usa para criá-la. Dessa forma, foi definido uma forma de elemento que usa exclusivamente elementos quadriláteros em seções bidimensionais, como ilustra a Figura 4.9, e uma técnica de criação de malha livre.



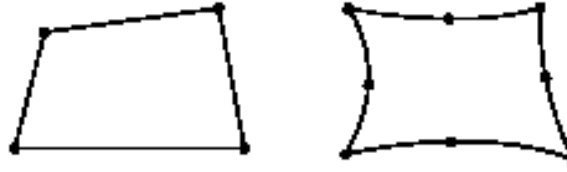


Figura 4.9: Elemento quadrilateral utilizado na malha.

É importante salientar que a malha foi criada de forma que um nó se localizasse exatamente na região onde se deseja determinar as temperaturas. Após isso, foi definido o elemento finito DC2D4 para a discretização da malha de todo o modelo, que é um elemento quadrilateral de 4 nós pertencente à família de transferência de calor, de ordem geométrica linear e presente na biblioteca de elementos *Standard*. Outros elementos finitos foram considerados na simulação numérica e os resultados obtidos se apresentaram semelhantes.

Ao se trabalhar com o MEF, quanto mais refinada for a malha, ou seja, quanto menores forem as dimensões dos elementos que compõem a malha, maior é a tendência de melhor representar o meio contínuo e o comportamento real, e, portanto, melhor o resultado do modelo numérico. Outras malhas mais e menos refinadas também foram consideradas, observando-se que, a partir de um certo ponto de refinamento da malha, todos os resultados apresentaram o mesmo aspecto geral. Desta forma, pode-se então concluir que o ganho de precisão nos resultados não faz mais sentido, pois esse ganho passa a ser pequeno se comparado ao significativo aumento de memória e do tempo de processamento.

Para cada modelo de viga mista simulada no ABAQUS, foi utilizada uma malha diferente, devido aos tamanhos variados do perfil metálico. A Figura 4.10 ilustra o desenho da malha da viga mista 1 (SPC).

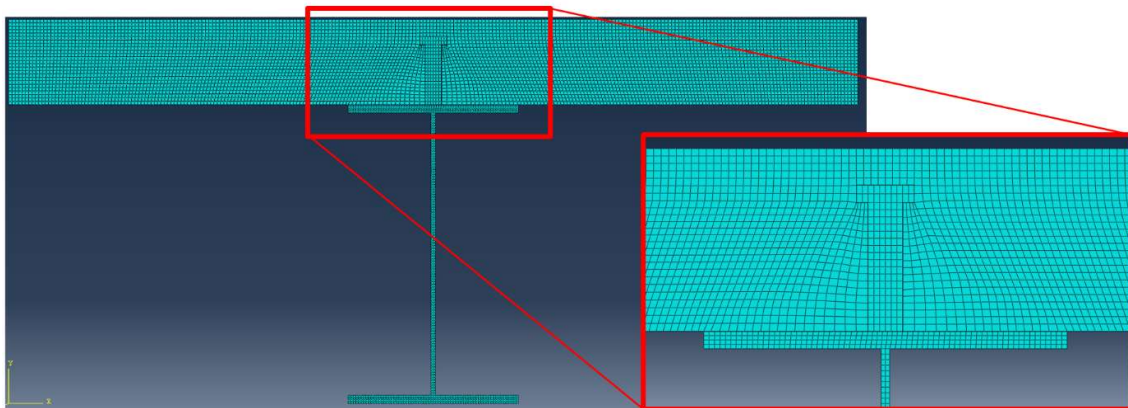


Figura 4.10: Malha de elementos finitos da viga mista 1 (SPC).

O módulo *Step* é utilizado para criar etapas de análise. O ABAQUS cria um passo inicial especial no início da sequência de etapas do modelo, que permite que se definam as condições iniciais e as interações. Após o passo inicial, foi criada uma nova etapa de análise de transferência de calor de 7200 segundos, correspondente a um TRRF de 120 minutos, para uma resposta transiente, com incremento de 60 segundos. Uma análise térmica transiente possibilita determinar a distribuição e os valores das temperaturas ao longo do tempo.

O módulo *Interaction* é usado para definir as interações térmicas, como as condições de transferência de calor convectivo e emissividade resultante, entre regiões de um modelo ou entre a região do modelo e as suas fronteiras. As interações são objetos dependentes das etapas, o que significa que, quando são definidas, tem-se que indicar em qual das etapas da análise devem estar ativas. Na amplitude da temperatura atingida no contorno da viga mista, foi respeitada a curva “temperatura x tempo” do “Incêndio-Padrão”, sendo estabelecida uma temperatura máxima dos gases igual a 1049 °C. Dessa forma, foram introduzidas as interações térmicas da viga mista com os gases quentes e com os gases em temperatura ambiente, e, também, do perfil metálico com a laje, com o material de proteção e com o ar presente na proteção tipo caixa. As temperaturas são expressas a partir da escala de temperatura em graus Celsius, sendo assim, neste caso, considerada a temperatura absoluta igual a -273,15 °C, e a constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma$ , igual a  $5,67 \times 10^{-8} \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}^4$ .

No módulo *Load*, utilizado para atribuir as condições iniciais, foi determinada a temperatura inicial da seção transversal igual à temperatura ambiente, ou seja, 20 °C.

Após a etapa do pré-processamento, foram definidas as variáveis de saída, que são as temperaturas dos nós previamente selecionados, situados nas partes em que se deseja obter os resultados.

O processamento ocorre no módulo *Job*, que é utilizado para analisar o modelo, e permite criar, submeter e monitorizar uma tarefa. Dessa forma, no pós-processamento, foi possível obter todos os resultados gráficos, observando o gradiente de temperatura em qualquer tempo de duração de incêndio, além das curvas “temperatura x tempo” de qualquer nó especificado da seção transversal mista.

## **CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE TÉRMICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Todos os resultados do presente trabalho foram obtidos por meio de simulações numéricas realizadas no programa ABAQUS ® Versão 6.14 (SIMULIA, 2014) e por cálculos realizados de acordo com a norma NBR 14323 (ABNT, 2013). Como resultado da análise térmica, observa-se o desenvolvimento e a distribuição do campo de temperaturas na seção transversal de toda a viga mista. Os resultados da análise foram divididos em quatro etapas: análise do comportamento térmico genérico, análise térmica comparada (ABAQUS x NBR 14323), análise de vigas mistas sem material de proteção térmica e análise de vigas mistas com material de proteção térmica.

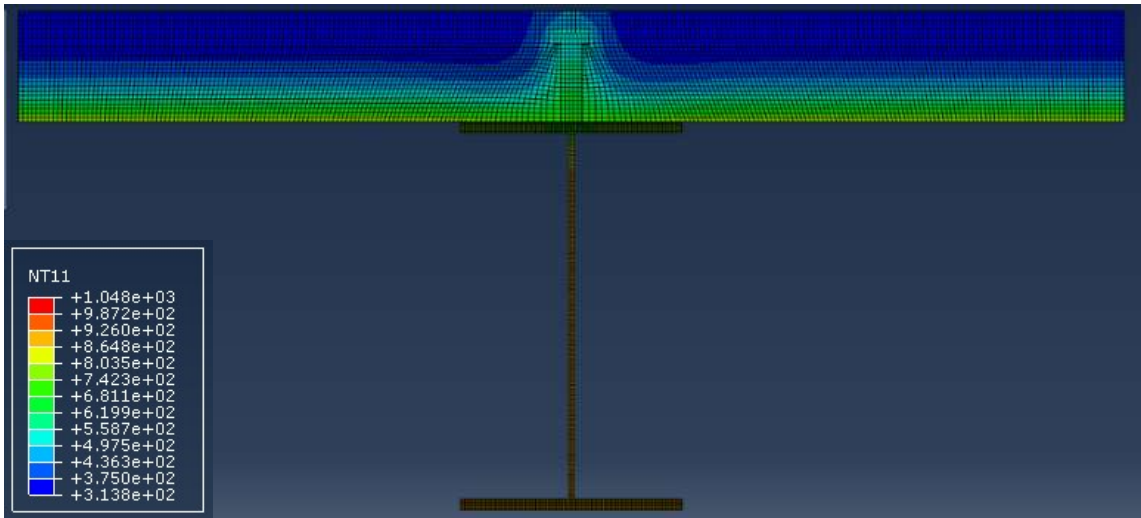
As vigas mistas são consideradas com as nomenclaturas definidas no Capítulo 4.

### **5.1 - Análise do comportamento térmico genérico**

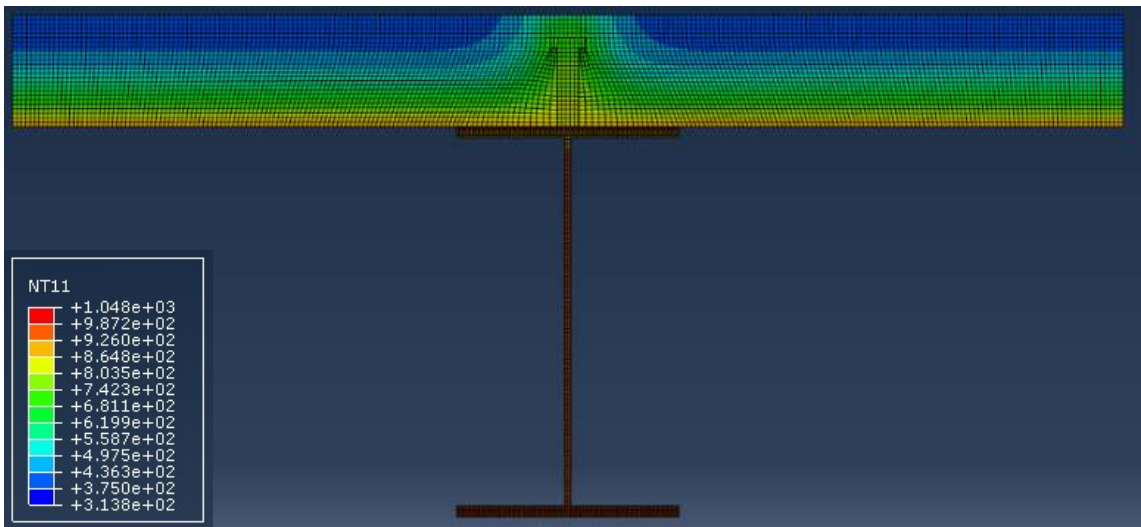
Esta análise, realizada por meio do programa ABAQUS, tem como objetivo descrever o comportamento térmico genérico em situação de incêndio de uma viga mista sem proteção térmica e a ligação feita com o conector *Stud Bolt* na interface entre a viga e a laje. Esta análise foi feita na viga mista 1 (SPC), tornando possível observar a distribuição do campo de temperaturas, valores da temperatura em pontos específicos da seção transversal, fluxo do calor na região do conector e, também, as curvas “temperatura x tempo” das regiões de máxima temperatura das mesas inferior e superior, da alma, do conector e da laje.

#### **5.1.1 - Campo de temperaturas da seção transversal**

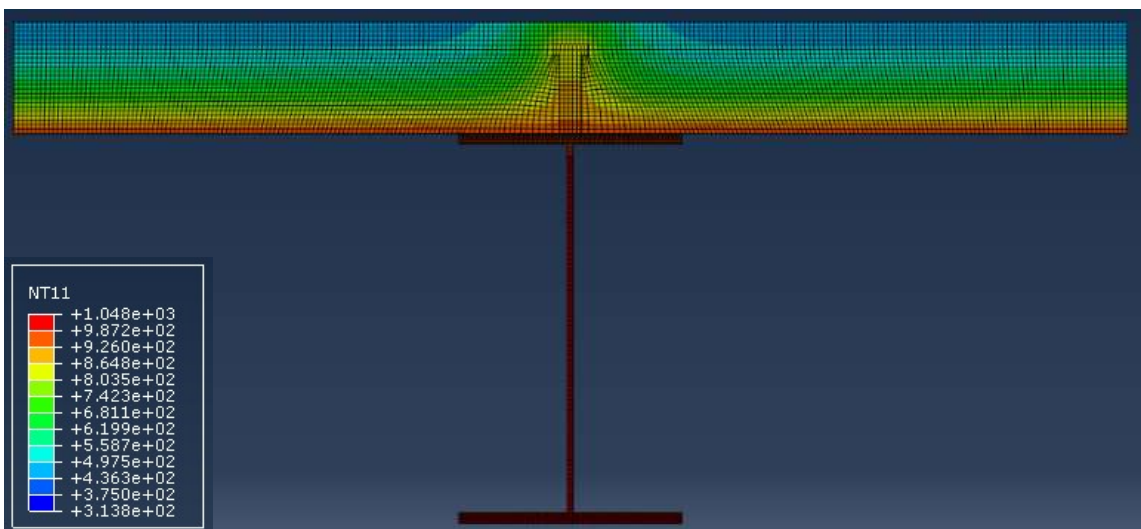
Com o campo de temperaturas é possível analisar a distribuição da temperatura em toda a seção transversal, observando as regiões que apresentam temperaturas mais elevadas. A Figura 5.1 apresenta os campos de temperaturas para os tempos de duração do incêndio de 30, 60, 90 e 120 minutos na viga mista 1 (SPC).



(a)



(b)



(c)

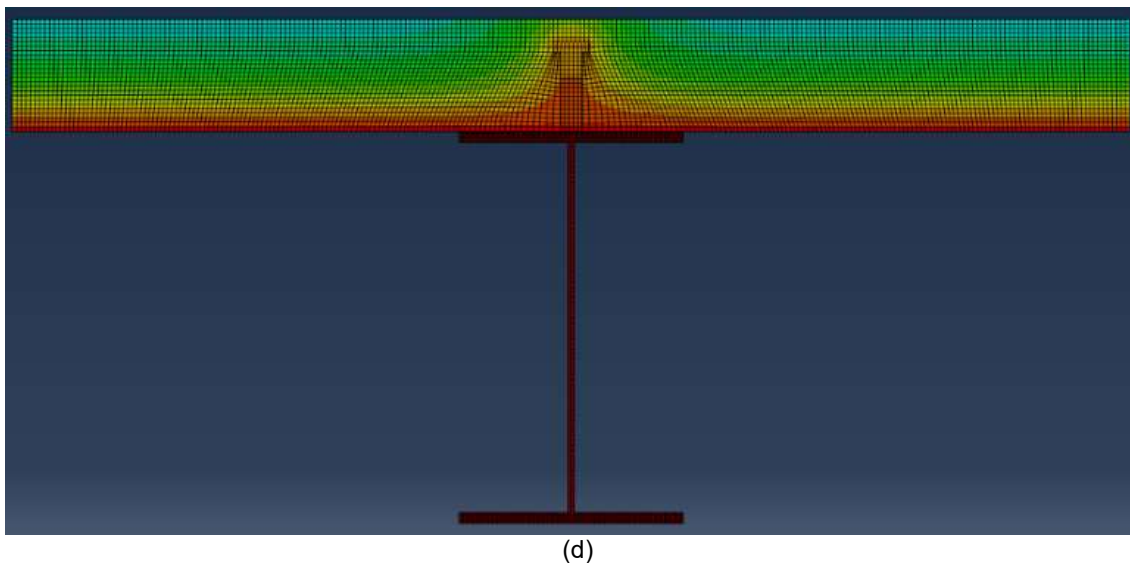


Figura 5.1: Campos de temperaturas da viga mista 1 (SPC) nos TRRF de: (a) 30 minutos, (b) 60 minutos, (c) 90 minutos e (d) 120 minutos.

Pode-se observar, no gradiente de temperaturas da Figura 5.1, que as cores variam do azul ao vermelho, representando, respectivamente, as baixas e as altas temperaturas. O campo de temperaturas na laje de concreto é uniforme ao longo da largura efetiva, exceto na região que contém o conector, devido à diferença de condutividade térmica entre o aço e o concreto. A temperatura na laje é maior na superfície exposta ao incêndio e diminui à medida que se aproxima da superfície em contato com a temperatura ambiente. Em relação ao perfil metálico, a temperatura mínima está na mesa superior, onde pode ser observada uma cor alaranjada, enquanto que a máxima se apresenta na alma do perfil metálico, onde a região é mais avermelhada, mais precisamente no centro de gravidade do perfil metálico. No tempo de 30 minutos, é possível observar, com mais evidência, que a alma não apresentou uma temperatura uniforme em toda sua altura. Observa-se que o conector não obteve uma temperatura uniforme ao longo de sua altura, apresentando uma temperatura maior em sua base (região em contato com a mesa superior do perfil) e uma temperatura menor em seu topo.

### 5.1.2 - Distribuição da temperatura em pontos específicos

É possível analisar o campo de temperaturas com mais detalhes por meio dos valores exatos de temperatura em determinados pontos e observar a diferença do gradiente em cada parte específica da viga mista. A Figura 5.2 apresenta valores de

temperatura em quinze pontos específicos da viga, do conector e da laje durante os tempos de duração do incêndio de 30, 60, 90 e 120 minutos da viga mista 1 (SPC).

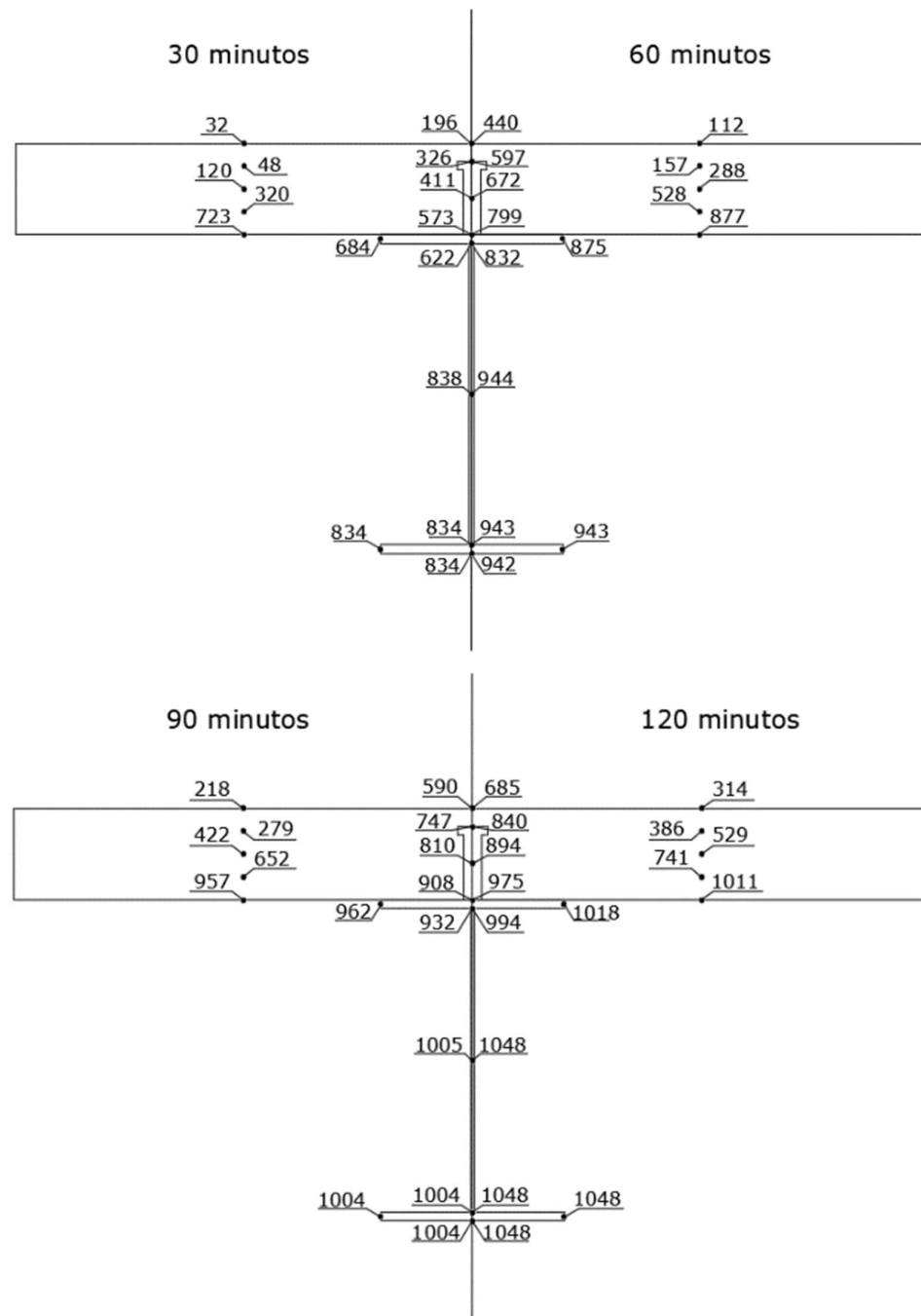


Figura 5.2: Distribuição das temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) na viga mista 1 (SPC) para os TRRF de 30, 60, 90 e 120 minutos.

Pela Figura 5.2, pode ser observado que a mesa superior apresentou temperatura máxima em sua extremidade e, como não estava totalmente exposta ao incêndio devido à presença da laje, alcançou temperaturas menores do que a mesa

inferior, a qual estava exposta ao incêndio por todos os lados, em todo o tempo de incêndio. A mesa inferior apresentou, em toda a sua região, uma mesma temperatura para um determinado tempo de incêndio. A alma apresentou uma temperatura menor mais perto da mesa superior. A temperatura do conector foi mais elevada na região mais próxima da mesa superior devido à condução de calor entre essas duas partes. Esta análise permite considerar que as regiões de temperatura máxima  $T_{m\acute{a}x}$  de cada parte da viga mista podem ser consideradas nos pontos indicados na Figura 5.3.

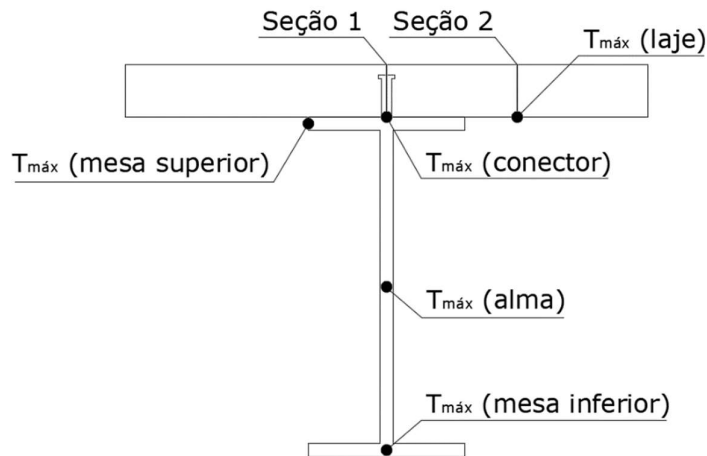


Figura 5.3: Regiões de temperatura máxima das partes da seção transversal mista.

### 5.1.3 - Condução de calor na região do conector

Na Figura 5.4, é possível observar a direção do fluxo de calor na região em que se encontra o conector de cisalhamento.

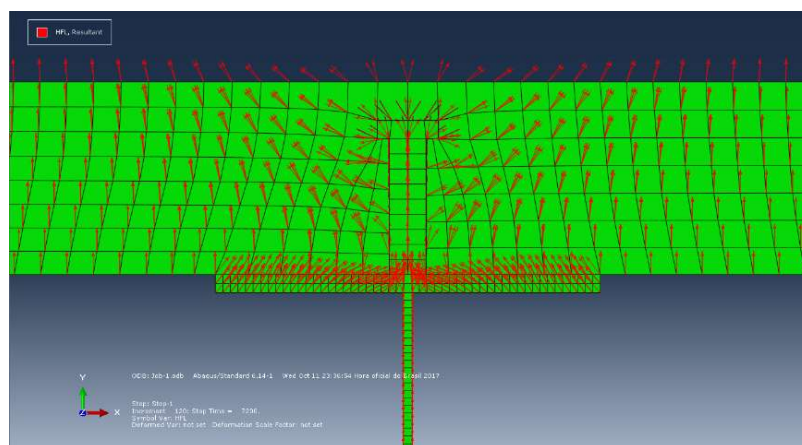


Figura 5.4: Condução do fluxo calor no interior da viga mista 1 (SPC).

A resultante vetorial do fluxo térmico (ou fluxo de calor) é representada por setas vermelhas que se direcionam da região de maior temperatura para a região de

menor temperatura. Devido à diferença de condutividade térmica entre o conector e a laje, houve uma concentração maior do fluxo de calor da mesa superior para o conector, que são do mesmo material (aço), apesar de haver fluxo de calor entre a mesa superior e a laje. Diante disso, observa-se que o fluxo se direcionou da superfície exposta ao fogo para a superfície não exposta, e a condutividade do material influenciou no caminho feito pelo fluxo.

#### 5.1.4 - Curvas “temperatura x tempo”

As curvas “temperatura x tempo” possibilitam observar a evolução da temperatura de um determinado ponto da seção transversal ao longo do tempo. Isso permite comparar a temperatura entre as partes da seção transversal da viga mista, e também a temperatura do ar atmosférico em situação de incêndio. Os pontos escolhidos para análise são os de máxima temperatura das mesas, da alma, da laje e do conector. As curvas “temperatura x tempo” dessas regiões da viga mista 1 (SPC), da mesa superior da viga mista 1 (SP) e do “Incêndio-padrão” estão representadas na Figura 5.5.

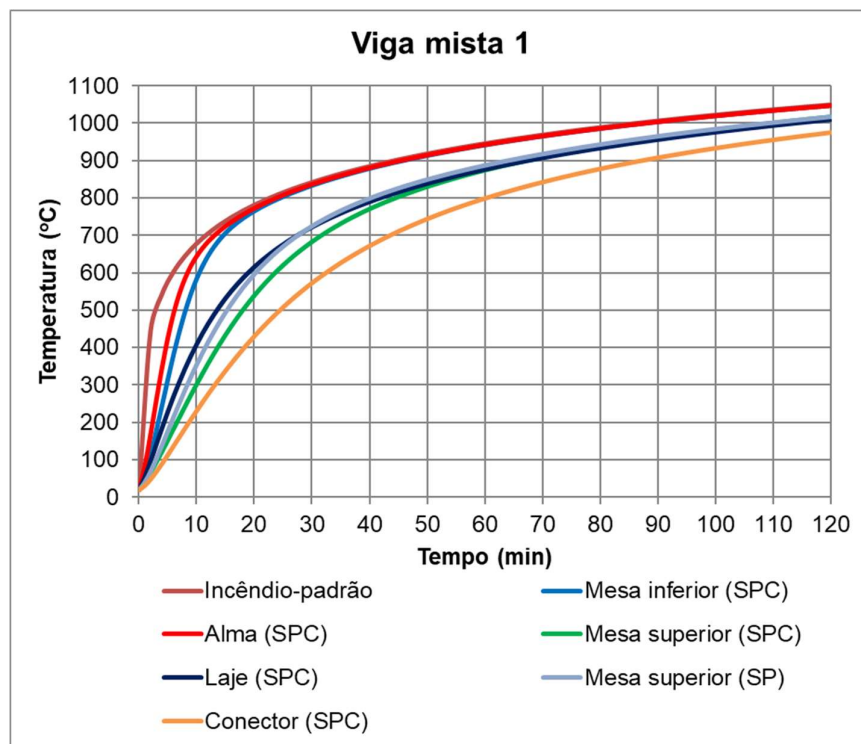


Figura 5.5: Curvas “temperatura x tempo” da viga mista 1 (SPC), da mesa superior da viga mista 1 (SP) e do ar atmosférico.



A temperatura de toda a viga mista (perfil metálico, conector e laje) é crescente com o tempo, assim como a temperatura dos gases em situação de incêndio. As curvas “temperatura x tempo” da alma e da mesa inferior tiveram uma elevação muito acentuada em relação às curvas das outras partes da seção nos primeiros 20 minutos, até atingir temperatura igual a do ar atmosférico. As máximas temperaturas da mesa superior, do conector e da laje apresentaram uma elevação da temperatura menos acentuada do que do restante da viga mista. A temperatura da laje se desenvolveu mais rápido que da mesa superior nos primeiros 50 minutos e depois as curvas se tornaram semelhantes. O conector foi o elemento que apresentou a menor temperatura durante todo o tempo de incêndio.

Para a curva “temperatura x tempo” do centro da mesa superior da mesma viga mista sem a presença do conector de cisalhamento, pode-se observar que a temperatura encontrada foi mais elevada em relação a temperatura máxima da mesa superior quando há presença do conector. Isso mostra que a presença do conector aumentou o fluxo de calor da mesa superior, provocando uma diminuição da temperatura na mesa. Logo, isso permitiu considerar que as análises térmicas pudessem ser feitas sem a presença do conector e considerando a máxima temperatura da mesa superior em seu centro. A ausência do conector não influenciou nas temperaturas máximas da alma, da mesa inferior e da laje.

## **5.2 - Análise térmica comparada: ABAQUS x NBR 14323**

O objetivo desta análise é associar os resultados obtidos pela modelagem numérica realizada no ABAQUS com o método de cálculo simplificado proposto pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013). Foram realizadas várias análises preliminares até que o modelo começasse a apresentar resultados coerentes, estabelecendo-se um modelo-base a partir do qual seria realizada a validação. Definido o modelo-base, os principais parâmetros foram alterados isoladamente, de maneira que a interpretação da influência de cada um deles fosse mais fácil de ser observada.

Nesta análise, é possível comparar a temperatura em vários tempos de duração do incêndio, para cada parte da seção transversal da viga mista, em três situações: perfil sem proteção, perfil com proteção tipo contorno e com proteção tipo caixa. Foram feitas análises tanto utilizando o ABAQUS, considerando as condições reais do comportamento de vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio, como também,

análises empregando as considerações feitas pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013). Para esta análise, foram utilizadas as vigas mistas 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

### 5.2.1 - Curvas “temperatura x tempo” das partes do perfil metálico

Foram escolhidas, para esta etapa, a viga mista 2, com dimensões maiores, a viga mista 5, com dimensões menores, e as vigas mistas 3, 4 e 6, com dimensões intermediárias, com o objetivo de verificar se a diferença no tamanho e na massa dos perfis gera alguma influência na comparação das curvas. Foi considerada também a curva “temperatura x tempo” da alma calculada pelo método da norma NBR 14323 (ABNT, 2013), para o perfil sem proteção e com proteção tipo contorno; porém, com alteração na fórmula do fator de massividade, que foi determinado da seguinte forma:

$$\text{Fator de massividade} = \frac{2 \times (h + t_w)}{h \times t_w} \quad (5.1)$$

Esta fórmula foi obtida considerando a razão do perímetro pela área da seção transversal da alma.

#### a) Perfil sem proteção térmica

Para o caso do perfil sem proteção térmica, foram utilizadas as vigas mistas 2, 5 e 6. Na Figura 5.6, estão representadas, em ordem, do perfil mais leve para o perfil mais pesado, as curvas “temperatura x tempo” obtidas através do método de cálculo da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e por meio da simulação numérica no ABAQUS, relativas às partes da viga de aço.

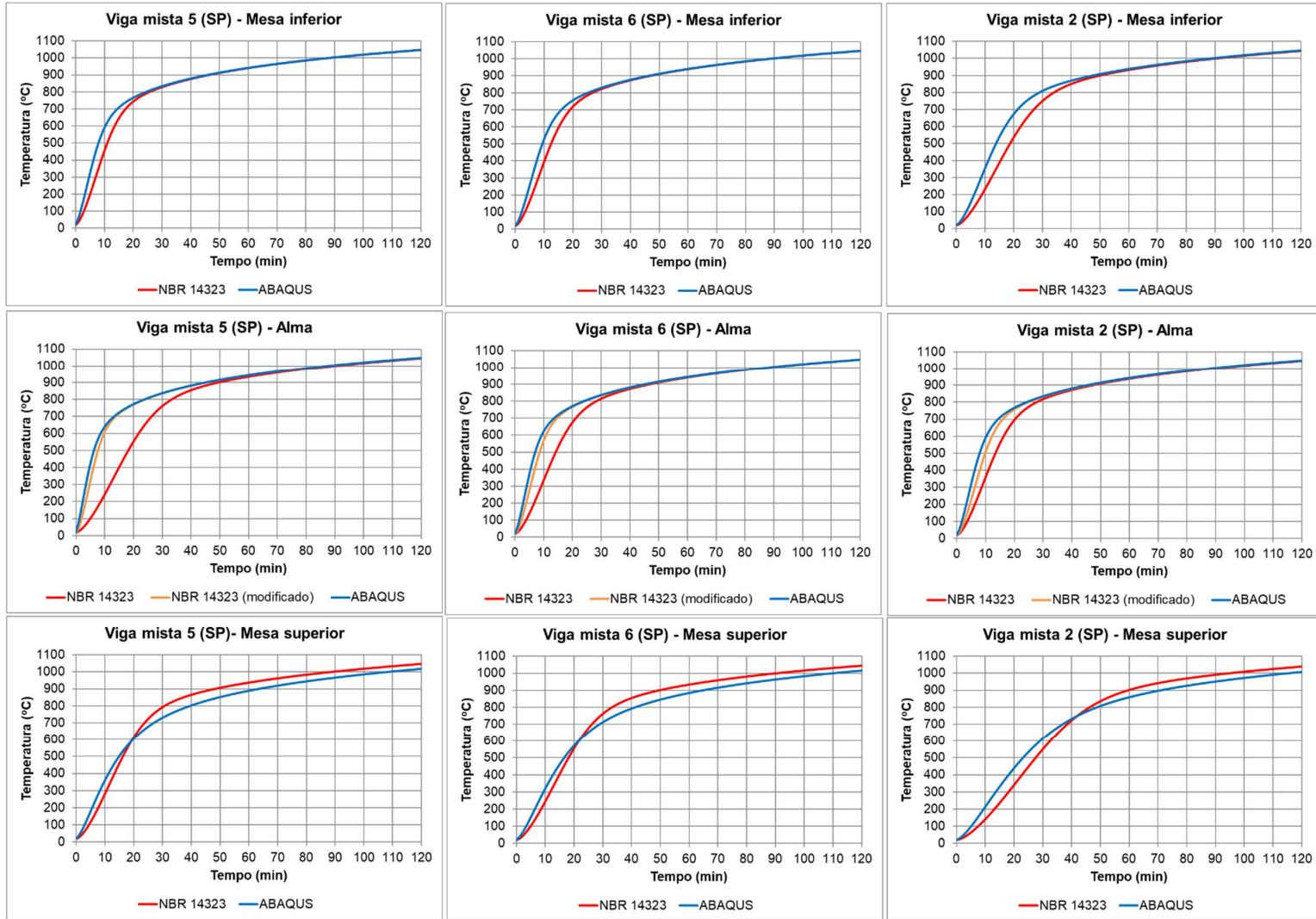


Figura 5.6: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 5 (SP), da viga mista 6 (SP) e da viga mista 2 (SP).

Em relação à mesa inferior, a temperatura obtida pelo ABAQUS foi superior à obtida pela norma em torno dos primeiros 40 minutos. A diferença das curvas entre os dois métodos foi mais significativa no perfil da viga mista 2 (SP) e, após isso, as duas curvas “temperatura x tempo” se igualaram. Diante desses resultados, observa-se que houve uma melhor concordância das curvas à medida que as dimensões da mesa inferior se tornam menores.

Na alma, a curva obtida pelo ABAQUS foi superior à obtida pela norma até um determinado momento e essa diferença foi menor na viga mista 2 (SP). No entanto, a curva do ABAQUS se aproximou mais da curva obtida com alteração na fórmula do fator de massividade da alma, para todos os perfis analisados. Foi possível observar que há uma melhor concordância das curvas em perfis de maior massa quando se utiliza o fator de massividade proposto pela norma e em perfis de menor massa quando se altera a fórmula do fator de massividade.

Já em relação à mesa superior, a curva “temperatura x tempo” do ABAQUS foi superior a curva da norma entre 20 e 40 minutos para as vigas mistas analisadas. Após esse tempo, a curva obtida pela norma se manteve ligeiramente mais elevada.

O perfil da viga mista 6 (SP), de dimensões intermediárias em relação aos outros perfis, funciona como uma referência para mostrar a tendência de aproximação ou afastamento entre as curvas obtidas pelos diferentes métodos de cálculo.

#### **b) Perfil com proteção térmica tipo contorno**

Para o caso do perfil com proteção térmica tipo contorno, foram utilizadas as vigas mistas 2, 3 e 5. Na Figura 5.7, estão representadas, em ordem, do perfil mais leve para o perfil mais pesado, as curvas “temperatura x tempo” obtidas através do método de cálculo da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e através da simulação numérica no ABAQUS, referentes às partes da viga de aço.

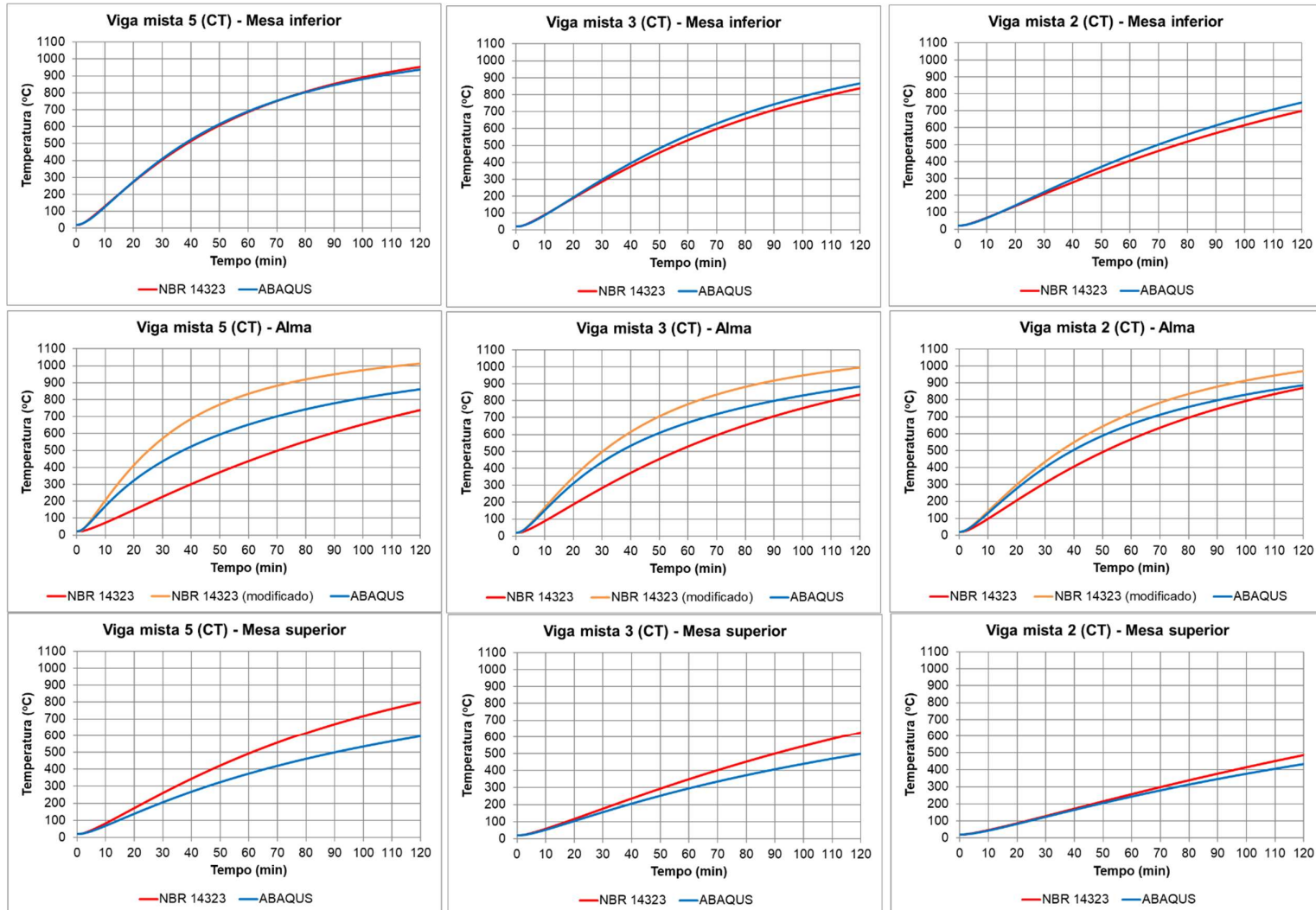


Figura 5.7: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 5 (CT), da viga mista 3 (CT) e da viga mista 2 (CT).

As curvas “temperatura x tempo” da mesa inferior são muito próximas uma da outra, principalmente para o perfil mais leve, utilizado na viga mista 5 (CT). A diferença das temperaturas obtidas pelo ABAQUS e pela norma se tornou ligeiramente maior, ao longo do tempo, quando o perfil teve um aumento nas suas dimensões.

Na alma, houve uma diferença mais acentuada entre as curvas obtidas pelos dois métodos, que foi mais evidente na viga mista 5 (CT), e as curvas tenderam a ser mais próximas à medida que o perfil se tornou maior, como no caso da viga mista 2 (CT). Os resultados obtidos pelo método simplificado com alteração na fórmula do fator de massividade da alma superestimaram os resultados obtidos pelo ABAQUS, e se apresentaram mais próximos na viga mista 2 (CT).

Em relação à mesa superior, as temperaturas obtidas pela norma foram superiores às temperaturas obtidas pelo ABAQUS. As curvas “temperatura x tempo” são muito semelhantes no perfil da viga mista 2 (CT), enquanto no perfil da viga mista 5 (CT), cuja mesa superior tem dimensões menores em relação aos demais, a diferença entre as curvas se torna maior com o tempo.

O perfil da viga mista 3 (CT), de dimensões intermediárias em relação aos outros perfis, funciona como uma referência para mostrar a tendência de aproximação ou afastamento entre as curvas obtidas pelos diferentes métodos de cálculo.

### **c) Perfil com proteção térmica tipo caixa**

Para o caso do perfil com proteção térmica tipo caixa, foram utilizadas as vigas mistas 2, 4 e 5. Na Figura 5.8, estão representadas, em ordem, do perfil mais leve para o perfil mais pesado, as curvas “temperatura x tempo” obtidas através do método de cálculo da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e por meio da simulação numérica no ABAQUS, relativos às partes da viga de aço.

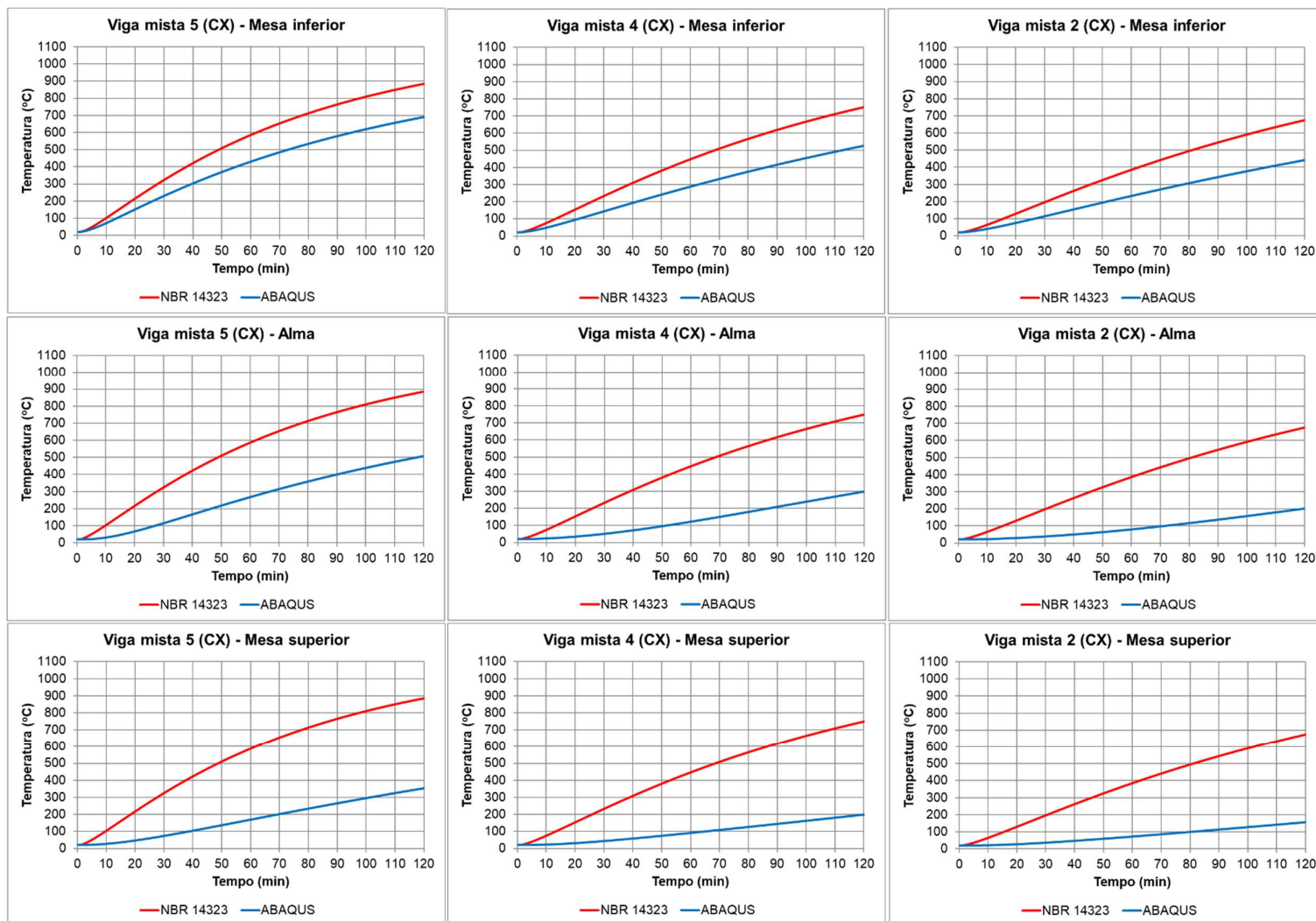


Figura 5.8: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 5 (CX), da viga mista 4 (CX) e da viga mista 2 (CX).

A curva “temperatura x tempo” obtida pela norma foi mais elevada que a curva obtida pelo ABAQUS em todas as partes do perfil, para qualquer perfil analisado e em todo o tempo de incêndio. A diferença entre essas curvas foi maior ao longo do tempo de duração do incêndio. Comparando os resultados dos perfis metálicos com pesos variados, um aumento do peso do perfil não influenciou na diferença entre as curvas das mesas e da alma de forma significativa.

### 5.2.2 - Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto

Esta etapa permite analisar no ABAQUS a temperatura da laje em duas seções, uma no centro da largura efetiva, onde se encontra o conector, e outra situada entre o centro e o fim da largura efetiva, como mostra a Figura 5.9. Para comparação com os resultados obtidos por meio da norma, foram utilizadas as vigas mistas 2 (SP), 3 (CT) e 4 (CX).

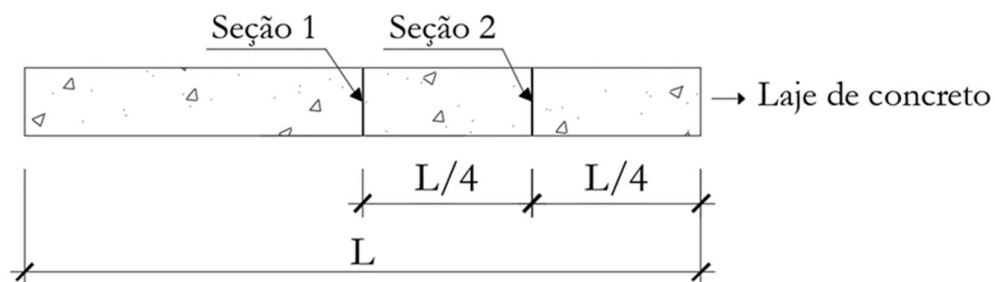


Figura 5.9: Seções analisadas na laje de concreto.

A norma apresenta uma fórmula para se calcular uma temperatura uniforme na laje de concreto que não se altera com as propriedades do concreto, nem com o tipo de perfil e nem com a presença de proteção térmica. A temperatura da laje não é uniforme ao longo de sua altura, em qualquer seção ou tempo de incêndio, diferente de como é considerado na norma. Para efeito de comparação, foram determinadas temperaturas em fatias da laje no ABAQUS e calculadas as temperaturas uniformes através da fórmula (3.50). As lajes dessas vigas mistas, de 10 cm, foram divididas em 14 fatias e suas temperaturas em cada seção, obtidas pelo ABAQUS, em quatro tempos de duração de incêndio, estão apresentadas nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.



Tabela 5.1: Espessura (mm) e temperatura (°C) das fatias da laje da viga mista 2 (SP).

<b>LAJE DA VIGA MISTA 2 (SP)</b>									
<b>Fatia</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Temperatura média das fatias (°C) - ABAQUS</b>							
		<b>Seção 1</b>				<b>Seção 2</b>			
		<b>30 min</b>	<b>60 min</b>	<b>90 min</b>	<b>120 min</b>	<b>30 min</b>	<b>60 min</b>	<b>90 min</b>	<b>120 min</b>
1	5	551	810	911	973	676	840	925	983
2	5	461	730	845	916	586	767	863	928
3	5	382	655	782	861	504	697	802	875
4	5	315	585	721	808	429	631	744	823
5	5	258	520	663	756	363	569	689	774
6	5	210	460	608	707	305	511	636	726
7	5	170	405	556	660	254	457	586	681
8	5	138	356	507	616	211	407	539	638
9	5	112	311	462	574	174	361	495	597
10	5	91	271	421	535	143	320	454	558
11	5	74	236	382	498	117	283	416	522
12	5	61	205	348	464	96	250	382	489
13	20	43	152	282	397	65	191	315	422
14	20	28	98	210	317	38	129	241	341

Tabela 5.2: Espessura (mm) e temperatura (°C) das fatias da laje da viga mista 3 (CT).

<b>LAJE DA VIGA MISTA 3 (CT)</b>									
<b>Fatia</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Temperatura média das fatias (°C) - ABAQUS</b>							
		<b>Seção 1</b>				<b>Seção 2</b>			
		<b>30 min</b>	<b>60 min</b>	<b>90 min</b>	<b>120 min</b>	<b>30 min</b>	<b>60 min</b>	<b>90 min</b>	<b>120 min</b>
1	5	141	275	385	476	676	840	925	982
2	5	118	242	349	439	586	767	862	926
3	5	99	213	315	404	504	697	801	873
4	5	83	187	285	372	430	631	743	821
5	5	70	164	257	343	363	569	687	770
6	5	59	144	232	315	305	511	634	722
7	5	51	126	209	290	254	457	584	676
8	5	44	110	188	266	211	407	537	633
9	5	38	97	170	245	174	361	493	592
10	5	34	85	153	226	143	320	452	553
11	5	30	75	138	208	117	283	414	517
12	5	28	66	125	192	96	250	379	483
13	20	24	52	101	162	65	190	313	416
14	20	21	38	76	128	38	129	239	336

Tabela 5.3: Espessura (mm) e temperatura (°C) das fatias da laje da viga mista 4 (CX).

LAJE DA VIGA MISTA 4 (CX)									
Fatia	Espessura (mm)	Temperatura média das fatias (°C) - ABAQUS							
		Seção 1				Seção 2			
		30 min	60 min	90 min	120 min	30 min	60 min	90 min	120 min
1	5	41	86	138	192	676	840	924	982
2	5	37	77	126	177	586	767	862	926
3	5	33	69	115	164	504	697	801	872
4	5	30	62	105	151	430	631	743	820
5	5	28	56	95	140	363	569	687	769
6	5	26	51	87	130	305	511	634	721
7	5	25	46	80	120	254	457	583	675
8	5	24	42	73	112	211	407	536	631
9	5	23	39	67	104	174	361	492	590
10	5	22	36	62	97	143	320	451	551
11	5	21	33	57	90	117	283	413	515
12	5	21	31	53	85	96	250	379	482
13	20	21	28	46	74	65	190	313	415
14	20	20	25	38	62	38	129	238	334

A Tabela 5.4 mostra a temperatura uniforme em quatro tempos de duração de incêndio, para laje com espessura de 10 cm, dessas três vigas mistas.

Tabela 5.4: Temperatura uniforme nas seções da laje (e = 10 cm) de concreto das vigas mistas 2(SP), 3 (CT) e 4 (CX).

Tempo (min)	Temperatura da laje (°C)						
	NBR	ABAQUS - Seção 1			ABAQUS - Seção 2		
		2 (SP)	3 (CT)	4 (CX)	2 (SP)	3 (CT)	4 (CX)
30	190	155	49	25	214	214	214
60	296	327	107	42	369	368	368
90	343	459	176	70	488	486	485
120	361	561	247	105	582	578	576

Pode-se observar, a partir da Tabela 5.4, que as temperaturas na laje de concreto, tanto na seção 1 como na seção 2, são diferentes dos valores calculados conforme a norma.

A seção 1 da laje, ao longo de sua altura, apresentou um gradiente de temperatura diferente para cada situação física a que estava sujeita a parte superior da laje, o que dependeu também da presença de material isolante e tipo de proteção térmica (contorno ou caixa). A seção 1 apresentou temperaturas maiores quando não

se utilizou proteção térmica, temperaturas intermediárias quando se utilizou proteção tipo contorno e temperaturas menores quando se utilizou proteção tipo caixa.

Na seção 2, a temperatura encontrada no ABAQUS foi superior à temperatura encontrada pela norma, e essa diferença apresentou-se maior com um TRRF maior. A seção 2 obteve a mesma temperatura em qualquer situação em que a viga mista se encontrava (com ou sem proteção) e com qualquer massa do perfil metálico, dependendo apenas das propriedades térmicas do concreto da laje. Essa seção, por apresentar as maiores temperaturas, foi considerada a seção crítica da laje de concreto; logo, é a seção ideal para fazer comparação com os valores obtidos por meio da norma.

Outro caso foi analisado considerando a variação da espessura da laje da viga mista 2 (SP), a fim de comparar os resultados do ABAQUS com os resultados obtidos pelo método simplificado da norma. A nova espessura da laje foi considerada de 7 cm e os resultados se encontram na Tabela 5.5 e na Figura 5.10.

Tabela 5.5: Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto e temperaturas máxima e mínima da viga mista 2 (SP).

Tempo (min)	Temperatura da laje (°C)				
	Espessura da laje = 10 cm (Viga mista 2 – SP)				
	NBR	ABAQUS			
Temp. Seção 1		Temp. Seção 2	Temp. mínima	Temp. máxima	
30	190	155	214	32	723
60	296	327	369	111	877
90	343	459	488	216	957
120	361	561	582	311	1010
Tempo (min)	Espessura da laje = 7 cm (Viga mista 2 – SP)				
	NBR	ABAQUS			
		Temp. Seção 1	Temp. Seção 2	Temp. mínima	Temp. máxima
30	243	212	293	90	723
60	374	446	500	274	879
90	412	608	641	426	961
120	417	718	738	533	1015

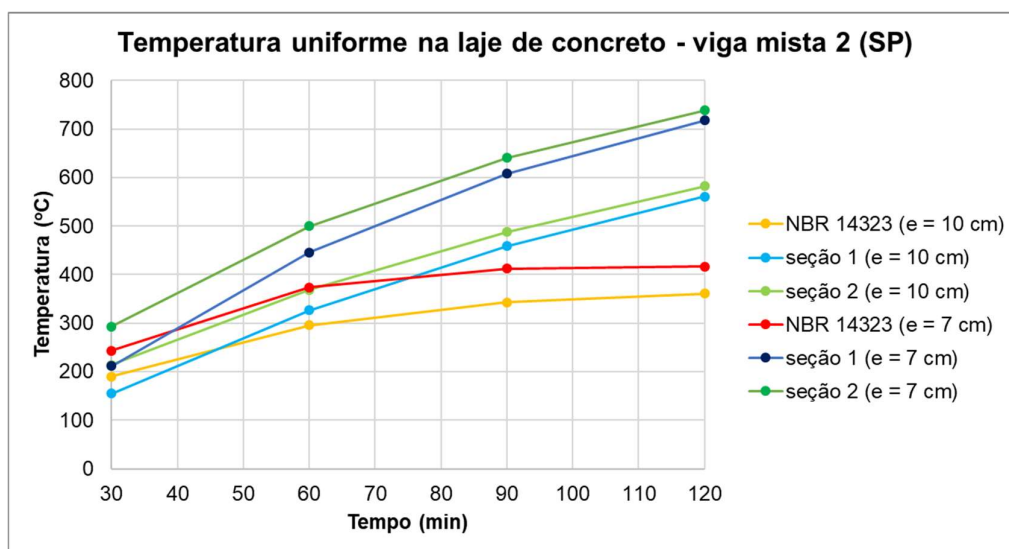


Figura 5.10: Temperatura uniforme na laje de concreto com espessura de 7 cm e 10 cm da viga mista 2 (SP).

Ao diminuir a espessura da laje de 10 cm para 7 cm, pode-se observar que a temperatura uniforme aumentou consideravelmente, tanto pelo método da norma como pelo ABAQUS, nas duas seções. Ainda assim, as temperaturas obtidas pelo ABAQUS foram diferentes das temperaturas obtidas pela norma. A temperatura mínima atingida pela laje (superfície da seção 2 não exposta ao incêndio) foi muito superior quando se diminuiu a espessura da laje, enquanto a temperatura máxima da laje (superfície da seção 2 exposta ao incêndio) não sofreu alterações significativas com a variação da espessura.

Observando a Figura 5.10, é possível visualizar melhor as diferenças de temperatura da laje da viga mista 2 (SP) com espessuras de 10 cm e 7 cm. Observa-se que, para a espessura maior, a temperatura obtida pelo ABAQUS se aproximou mais das temperaturas obtidas pela norma. A diminuição da altura da laje não resultou na alteração da curva “temperatura x tempo” da mesa superior.

### 5.2.3 - Temperatura do conector

O conector foi desconsiderado em todas as análises, para obter a máxima temperatura da mesa superior, como explicado anteriormente. Segundo a norma NBR 14323 (ABNT, 2013), a temperatura do conector pode ser considerada, conservadoramente, igual a maior temperatura entre aquelas dos elementos estruturais conectados. Como pode ser observado na Figura 5.11, referente ao

conector da viga mista 1 (SPC) utilizada no item 5.1, a temperatura do conector nunca atingiu a mesma temperatura da mesa superior após iniciar o incêndio. A temperatura do conector, excluindo os dois primeiros minutos de incêndio, variou entre 64 % e 96 % da temperatura máxima da mesa superior.

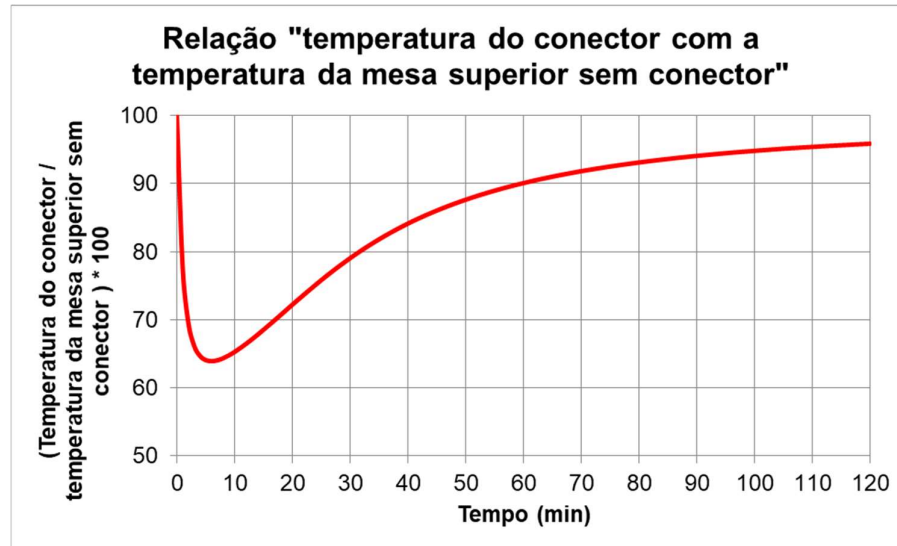


Figura 5.11: Relação temperatura do conector com a temperatura da mesa superior da viga mista 1 (SP).

#### 5.2.4 - Modelos numéricos considerando as condições estabelecidas pela Norma Brasileira

O método de cálculo simplificado proposto pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013) desconsidera a existência do ar no interior da cavidade de proteção tipo caixa e que há troca de calor entre as partes do perfil (mesa inferior, superior e alma) e entre a mesa superior e a laje para qualquer situação. Dessa forma, a viga mista 2 foi simulada no ABAQUS nas condições mostradas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Condições analisadas das vigas mistas.

Viga mista	Situação analisada	Condições
ABAQUS viga 2.1 (SP)	Perfil sem proteção térmica	sem troca de calor entre as partes e entre a mesa superior e a laje
ABAQUS viga 2.2 (CT)	Perfil com proteção térmica tipo contorno	sem troca de calor entre as partes e entre a mesa superior e a laje
ABAQUS viga 2.3 (CX)	Perfil com proteção térmica tipo caixa	sem troca de calor entre as partes e entre a mesa superior e a laje / sem ar no interior da cavidade da proteção
ABAQUS viga 2 (CX - sem ar)	Perfil com proteção térmica tipo caixa	com troca de calor entre as partes e entre a mesa superior e a laje / sem ar no interior da cavidade da proteção

Após isso, foi observada a influência destas condições ao comparar as curvas “temperatura x tempo” obtidas por meio da norma e do ABAQUS.

### a) Perfil sem proteção térmica

As curvas “temperatura x tempo”, obtidas através do ABAQUS e da norma, para as partes do perfil metálico da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2.1 (SP), estão representadas nos gráficos da Figura 5.12.

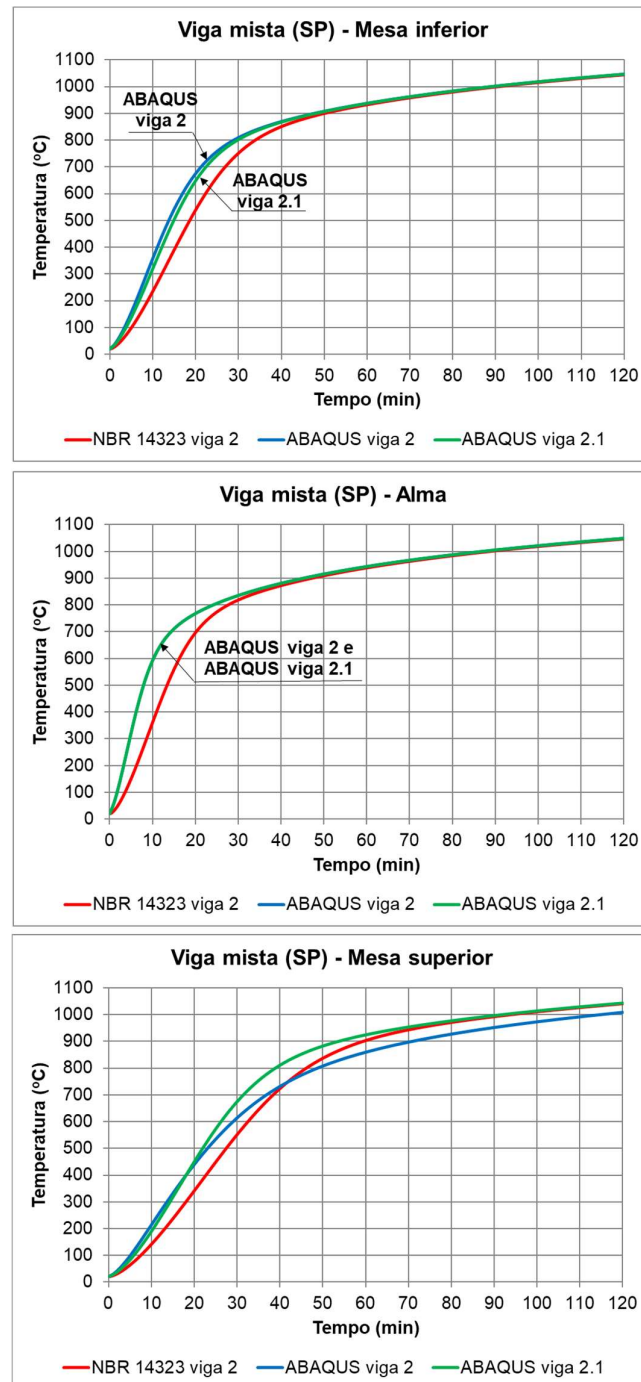
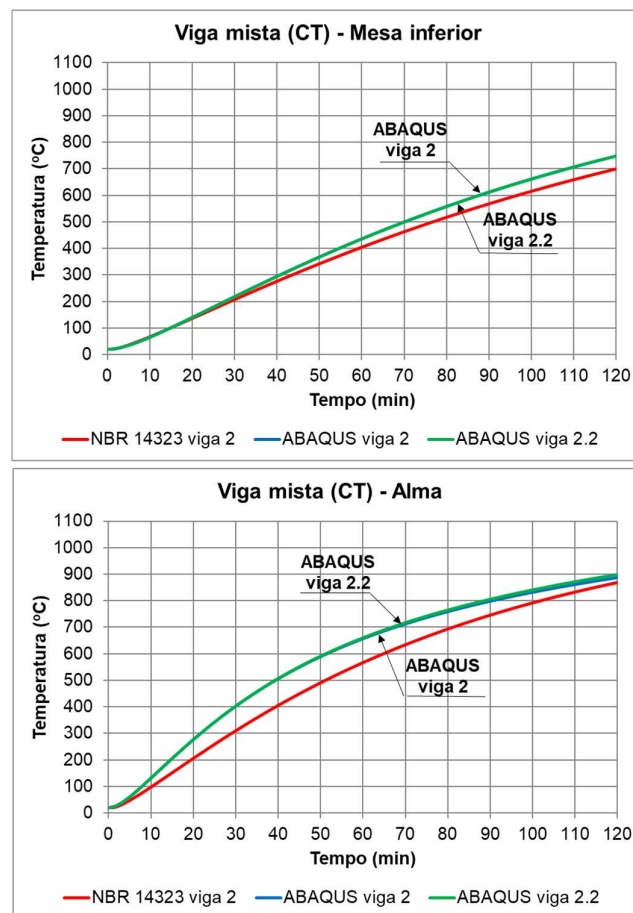


Figura 5.12: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2.1 (SP).

Na mesa inferior, houve uma diferença pouco significativa entre as curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo ABAQUS, enquanto na alma, as curvas se mantiveram iguais em todo o tempo de incêndio. A mesa superior foi a parte que apresentou maior diferença entre as curvas “temperatura x tempo”. Na viga mista 2.1 (SP), sem troca de calor entre as partes, a mesa apresentou uma temperatura superior à temperatura obtida por meio da norma até 70 minutos de incêndio e, depois, essas se igualaram. Essa temperatura mais elevada da mesa superior foi devida, principalmente, à não transferência de calor da mesa superior para a laje.

### b) Perfil com proteção térmica tipo contorno

As curvas “temperatura x tempo”, obtidas através do ABAQUS e da norma, para as partes do perfil metálico da viga mista 2 (CT) e da viga mista 2.2 (CT), estão representadas nos gráficos da Figura 5.13.



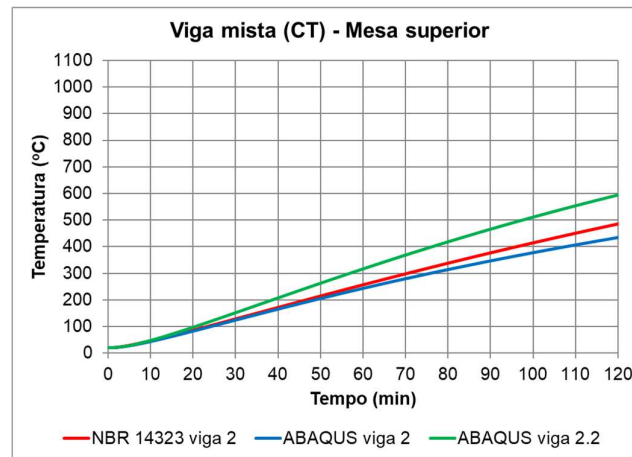
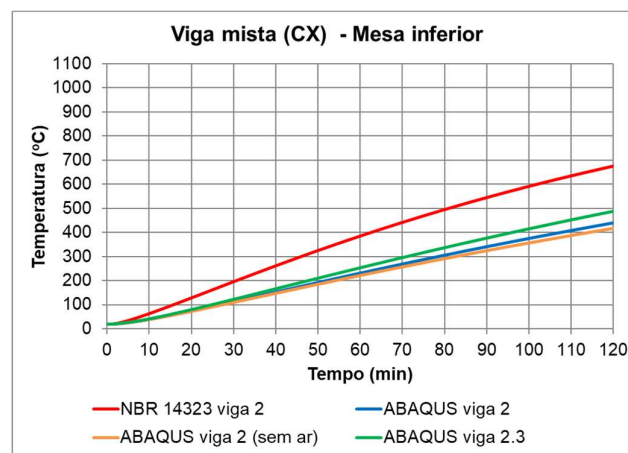


Figura 5.13: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2.2 (SP).

Na proteção tipo contorno, foi considerada a condução de calor do material térmico para as partes do perfil metálico. Em relação à mesa inferior e à alma, as curvas obtidas pelo ABAQUS foram iguais, e a diferença para a curva obtida pela norma se manteve a mesma. Na mesa superior, a temperatura foi maior ao longo do tempo na viga mista 2.2 (CT) pela mesma razão de quando o perfil não tem proteção térmica, ou seja, impedir que o calor se transfira da mesa superior para a laje faz aumentar a temperatura na mesa.

### c) Perfil com proteção térmica tipo caixa

As curvas “temperatura x tempo”, obtidas através do ABAQUS e da norma, para as partes do perfil metálico da viga mista 2 (CX), da viga mista 2 (CX - sem ar) e da viga mista 2.3 (CX), estão representadas nos gráficos da Figura 5.14.





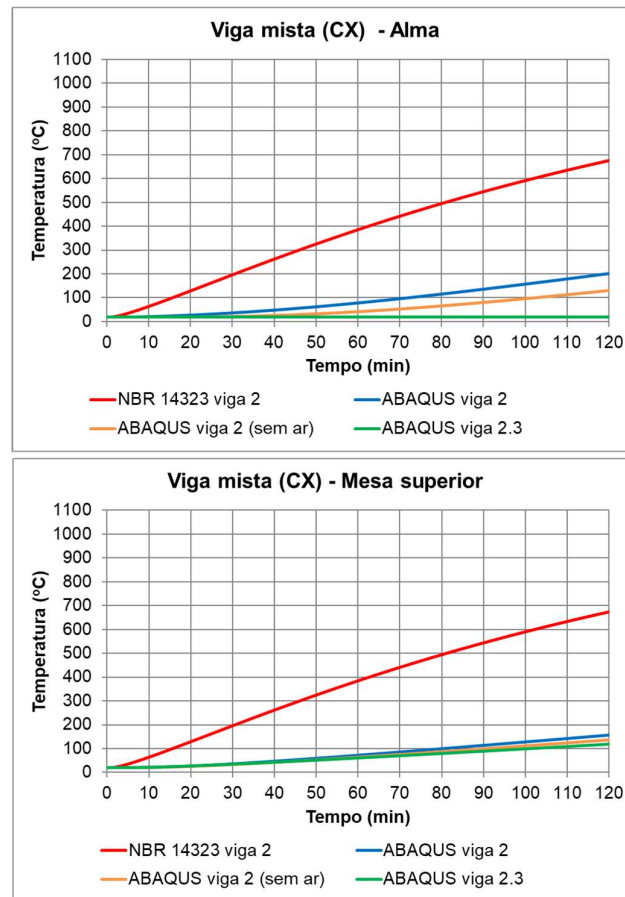


Figura 5.14: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2.3 (SP).

Em todo o perfil, as curvas “temperatura x tempo” encontradas com o ABAQUS para a viga mista 2.3 (CX) não se aproximaram dos resultados obtidos pela norma, porém, foram mais próximas das curvas obtidas, também com o ABAQUS, para a viga mista 2 (CX). A curva “temperatura x tempo”, referente à mesa inferior da viga mista 2.3 (CX), apresentou temperatura mais elevada, ao longo do tempo, que o modelo viga mista 2 (CX) por não haver troca de calor da mesa inferior com o ar e a alma, fazendo a temperatura da mesa ser sempre um pouco mais elevada. A alma da viga mista 2.3 (CX) apresentou temperatura igual à temperatura inicial, de 20 °C, por todo o tempo de incêndio, por três motivos: a alma não estava em contato diretamente com o fogo devido à existência da proteção, não recebeu calor das mesas inferior e superior, e não recebeu calor do ar, que foi desprezado. Dessa forma, isso mostra que essas condições impostas pela norma, em que a viga mista com proteção tipo caixa estava submetida, não condizem com a realidade. A mesa superior apresentou

temperaturas um pouco mais baixas ao longo do tempo, e isso pode ser devido à inexistência do ar, que não transfere calor para a mesa.

As temperaturas nas partes do perfil da viga mista 2 (CX – sem ar), obtidas pelo ABAQUS, foram um pouco menores em relação à viga mista 2 (CX), apresentando maior diferença entre as temperaturas na alma. Isso mostrou que a presença do ar tem maior influência na temperatura da alma.

#### d) Temperatura da laje

Nesta análise, só foi necessário verificar a seção 1 da laje, já que a seção 2 não sofreu alterações com a mudança das condições do perfil metálico. Como o caso da viga mista sem proteção térmica apresenta as maiores temperaturas, foi analisada a temperatura da seção 1 da laje da viga mista 2 (SP) e 2.1 (SP). A Tabela 5.7 mostra a temperatura da seção da laje calculada pelo método da norma e pelo ABAQUS

Tabela 5.7: Temperatura da seção 1 da laje da viga mista 2 (SP) e 2.1 (SP).

Tempo (min)	Temperatura da laje (°C)		
	NBR	ABAQUS - Seção 1	
		2 (SP)	2.1 (SP)
30	190	155	20
60	296	327	21
90	343	459	28
120	361	561	41

Diante dos resultados da Tabela 5.7, pode ser observado que a temperatura uniforme da seção 1 teve uma diminuição considerável em todo o tempo de duração de incêndio. Isso evidencia que a transferência de calor do perfil para a laje é a principal influenciadora na temperatura da laje na região do conector, descartando, portanto, a consideração de que não há troca de calor entre a mesa superior e a laje.

#### 5.2.5 - Variação das propriedades dos materiais aço e concreto em função da temperatura

Foi analisada, no ABAQUS, a viga mista 2 sem proteção com a variação das propriedades do aço e do concreto. A viga mista é identificada como viga mista 2 (SP-VP) e sua análise tem como objetivo comparar os novos resultados com os resultados do ABAQUS e da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) para a viga mista 2 (SP), já que

as fórmulas da norma permitem utilizar apenas valores constantes das propriedades, de forma simplificada. As propriedades alteradas foram a condutividade térmica e o calor específico do aço e do concreto, além da massa específica do concreto. As equações utilizadas para variação dessas propriedades estão mostradas nos itens 3.6 e 3.7 desta dissertação. As curvas “temperatura x tempo” obtidas para as partes do perfil se encontram na Figura 5.15.

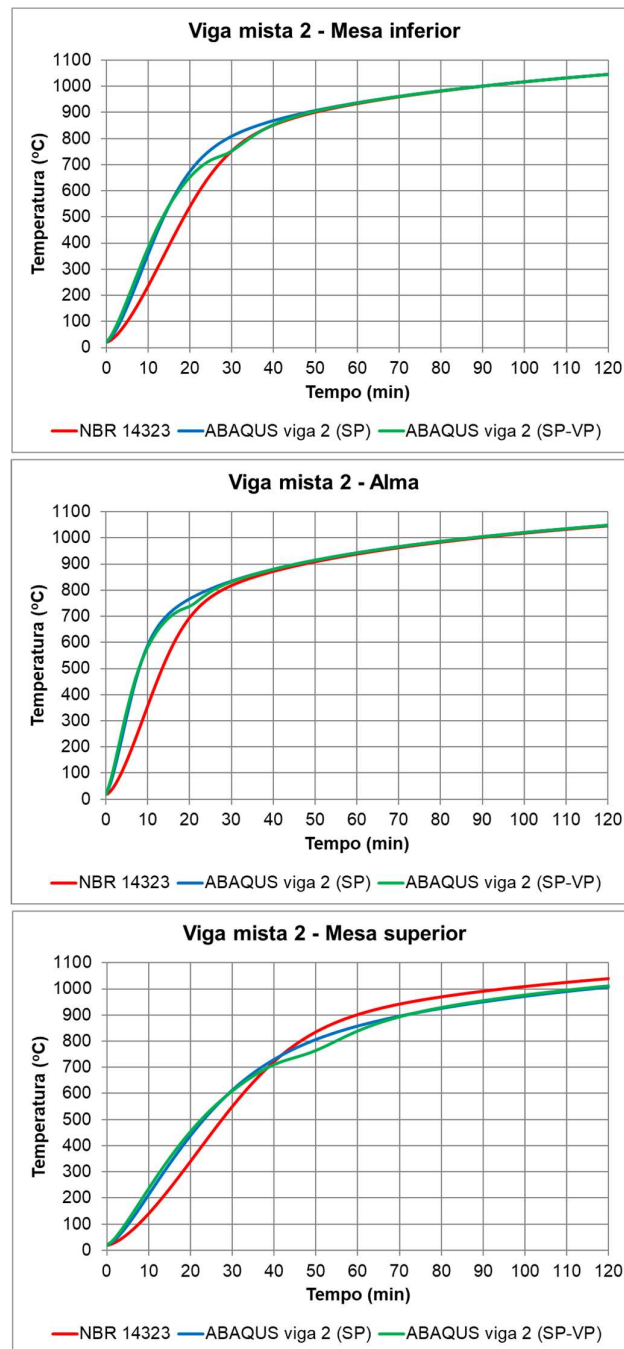


Figura 5.15: Curvas “temperatura x tempo” obtidas pelo método simplificado da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) e pela modelagem no ABAQUS para o perfil da viga mista 2 (SP) e da viga mista 2 (SP-VP).

A partir da Figura 5.15, comparando os resultados obtidos por meio do ABAQUS, a variação das propriedades dos materiais resultou em uma diferença pequena da curva “temperatura x tempo” do perfil metálico em uma determinada faixa de tempo, enquanto no restante do tempo, a variação foi insignificante. Pode ser observado que a temperatura da viga mista 2 (SP-VP) foi um pouco menor que na viga mista 2 (SP) para as partes do perfil, entre as temperaturas 700 °C e 850 °C. Dessa forma, utilizar valores das propriedades independente da temperatura, de forma simplificada, não gera alterações significativas na temperatura do perfil. Esse abaixamento da curva nesse intervalo pode estar relacionado ao calor específico do aço, que tem elevação e diminuição bruscas do seu valor no mesmo intervalo. Um aumento do calor específico gera uma diminuição na temperatura do aço. As novas considerações tenderam a antecipar a equivalência das curvas “temperatura x tempo” da mesa inferior e da alma com as respectivas curvas obtidas por meio da norma; porém, o mesmo não ocorreu para a mesa superior.

As temperaturas da laje em quatro tempos de duração de incêndio se encontram na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto das vigas mistas 2 (SP) e 2 (SP-VP).

Tempo (min)	Temperatura da laje (°C)								
	NBR	ABAQUS - Seção 1				ABAQUS - Seção 2			
		2 (SP)	2 (SP-VP)	Diferença (SP) - (SP-VP) (°C)	Diferença (SP) - (SP-VP) (%)	2 (SP)	2 (SP-VP)	Diferença (SP) - (SP-VP) (°C)	Diferença (SP) - (SP-VP) (%)
30	190	155	146	-9	-6	214	195	-19	-9
60	296	327	274	-53	-16	369	316	-53	-14
90	343	459	376	-83	-18	488	405	-83	-17
120	361	561	453	-108	-19	582	476	-106	-18

Pelos resultados da Tabela 5.8, observa-se que tanto na seção 1 como na seção 2, houve uma diminuição significativa na temperatura. Essa diferença (em graus Celsius e em porcentagem) entre os resultados do ABAQUS é maior quando o tempo é maior. Isso ocorreu devido ao calor específico do concreto apresentar valores maiores que o valor simplificado na maior parte do tempo e, principalmente, devido à diminuição da condutividade térmica do concreto ao longo do tempo. Logo, o aumento do calor específico e a diminuição da condutividade térmica do concreto provocaram uma diminuição na temperatura da laje. Observando a diferença da temperatura, em

porcentagem, as duas seções mantiveram praticamente o mesmo padrão de diferença nos tempos analisados.

### 5.3 - Análise de vigas mistas sem material de proteção térmica

Esta seção tem como objetivo observar a elevação da temperatura do perfil metálico em função do fator de massividade e das dimensões (h, bf, tw e tf) de cada uma das partes da seção de aço e, também, examinar o desenvolvimento da temperatura da laje e do perfil metálico de diferentes tamanhos durante o tempo de exposição ao incêndio. Para esta análise, foram utilizadas a viga mista 2 (SP), com perfil de dimensões maiores; a viga mista 5 (SP), com perfil de dimensões menores; e a viga 6 (SP), com perfil de dimensões intermediárias.

#### 5.3.1 - Influência do fator de massividade

A Tabela 5.9 mostra os valores dos fatores de massividade dos perfis metálicos e de cada parte dos perfis.

Tabela 5.9: Fator de massividade das partes e dos perfis das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 6 (SP).

Viga mista	Fator de massividade do perfil (m <sup>-1</sup> )			
	Mesa superior	Mesa inferior	Alma	Perfil metálico
2 (SP)	46	86	250	110
5 (SP)	115	220	421	235
6 (SP)	87	167	317	194

Observa-se que o perfil da viga mista 5 (SP), de dimensões menores, possui o maior fator de massividade, como também as suas partes, e o perfil da viga mista 2 (SP), de dimensões maiores, apresenta os menores valores do fator de massividade. Fazendo a comparação entre as partes de um perfil, a alma possui um maior valor do fator de massividade, a mesa inferior apresenta um valor intermediário e a mesa superior, por estar protegida do incêndio em uma parte, apresenta o menor fator.

A Figura 5.16 mostra as curvas “temperatura x tempo” das partes de cada perfil utilizado nesta análise, até o tempo de 40 minutos, com o objetivo de se observar a velocidade de aquecimento do aço em função do fator de massividade.

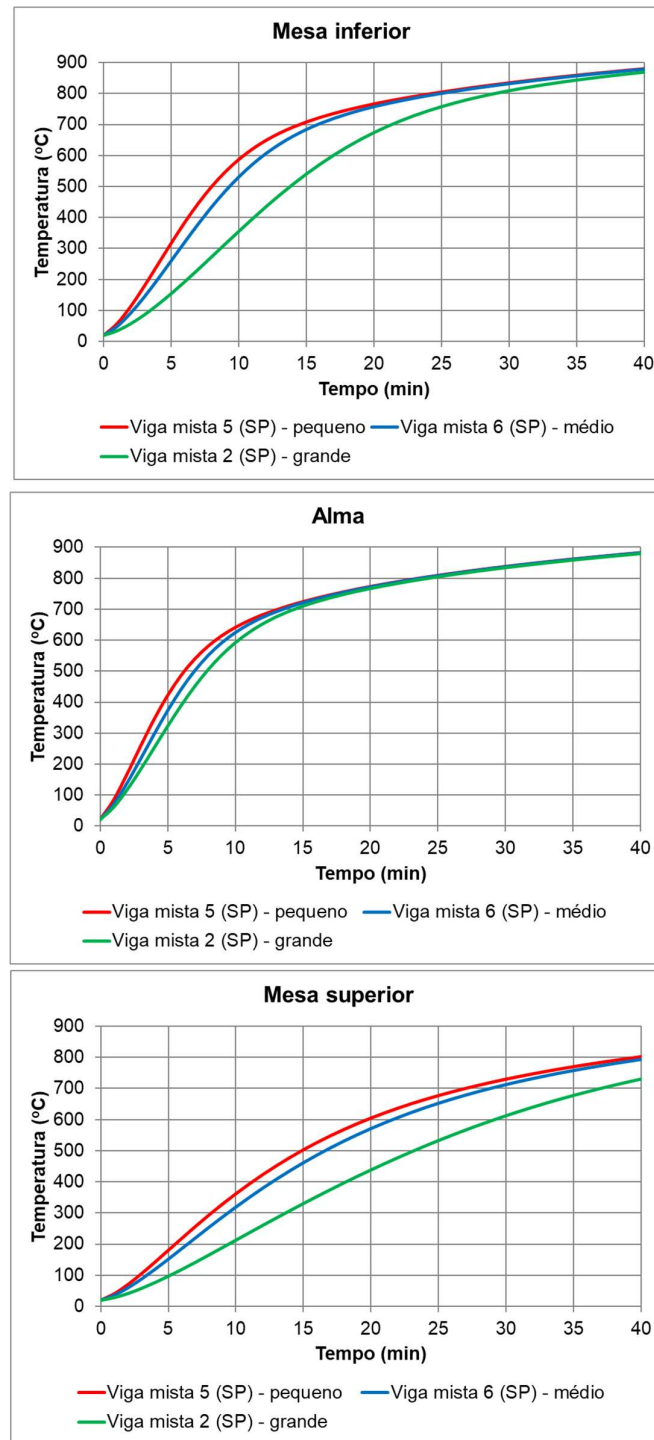


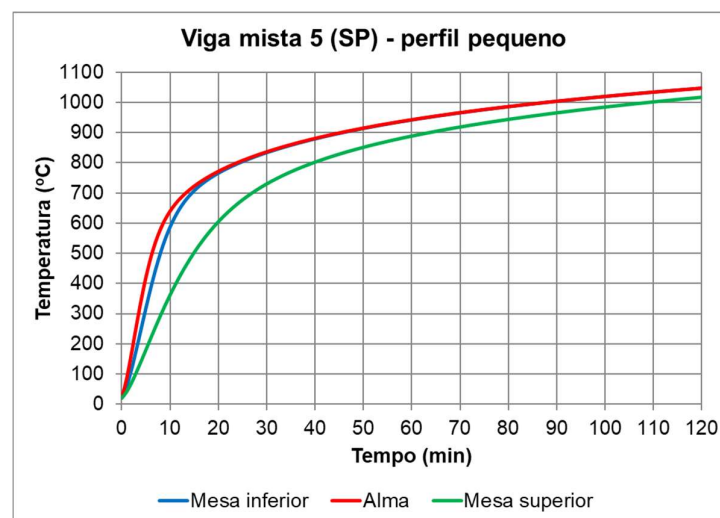
Figura 5.16: Curva “temperatura x tempo” das partes dos perfis metálicos das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 6 (SP).

Os primeiros minutos de incêndio são os mais importantes, pois é quando ocorre um aumento mais rápido da temperatura do perfil. Comparando as curvas “temperatura x tempo” de cada uma parte do perfil, entre os perfis analisados, observa-se que as curvas tenderam a se equivaler em algum momento. Na alma, após 15

minutos, a resposta térmica foi praticamente a mesma para os três casos, enquanto nas mesas, a diferença de temperatura se manteve por mais tempo. As partes do perfil da viga mista 5 (SP), de menores dimensões e maior fator de massividade, tiveram um aumento de temperatura mais elevado. Diferentemente, o perfil da viga mista 2 (SP), com menor fator de massividade, demorou mais para se aquecer ao ser submetido à alta temperatura, enquanto o perfil da viga mista 6 (SP) apresentou uma elevação intermediária. Observa-se que, o perfil 5 (SP) tem um fator de massividade mais próximo do perfil 6 (SP), e as curvas “temperatura x tempo” destes perfis também estão mais próximas. Isso mostra que um perfil com maior fator de massividade apresentará a curva “temperatura x tempo” mais inclinada, indicando que tem uma elevação de temperatura mais rápida.

### 5.3.2 - Desenvolvimento da temperatura no perfil metálico

A Figura 5.17 mostra as curvas “temperatura x tempo” dos perfis utilizados nesta análise, permitindo comparar o desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo entre as partes de cada perfil.



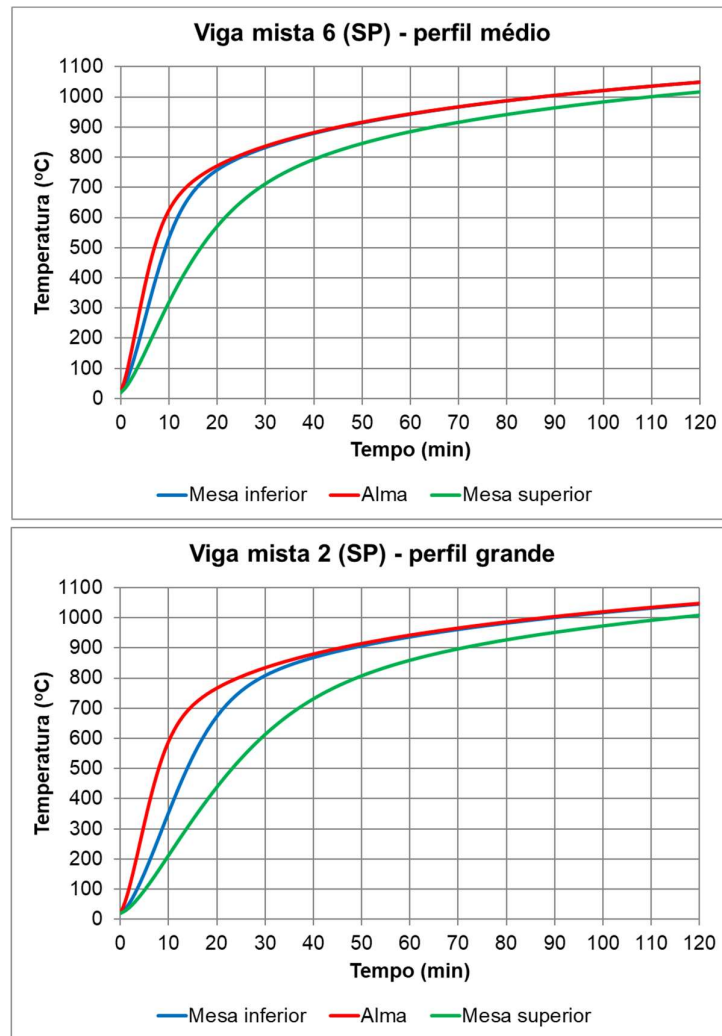


Figura 5.17: Desenvolvimento da temperatura nos perfis metálicos.

Nas três vigas mistas, os valores de temperatura da alma foram mais elevados, a mesa inferior apresentou valores intermediários e a mesa superior apresentou valores menores de temperaturas. Pode-se relacionar isso ao fator de massividade, sendo que a alma possui maior fator de massividade e a mesa superior, o menor fator de massividade. Na viga mista 5 (SP), a curva que representa a temperatura da alma é ligeiramente mais elevada que a curva de temperatura da mesa inferior e, à medida que a seção do perfil vai se tornando mais pesada, a diferença entre as duas curvas vai ficando maior. Portanto, a diferença apresentou-se ser mais evidente no perfil com dimensões maiores, como é o caso da viga mista 2 (SP). A inclinação das curvas “temperatura x tempo” torna-se menos pronunciada à medida que a seção de aço tem um menor fator de massividade. Independentemente do tamanho do perfil utilizado, a



temperatura máxima da mesa superior não coincidiu com a temperatura das outras partes do perfil em nenhum momento, enquanto as temperaturas máximas da alma e da mesa inferior se igualaram em um determinado tempo de incêndio.

### 5.3.3 - Influência das dimensões do perfil na temperatura

Com o objetivo de identificar qual dimensão provoca uma influência maior na temperatura das partes do perfil, foi criada uma viga mista 2-5 (SP), ilustrada na Figura 5.18, com as dimensões da laje iguais às da viga mista 2 (SP) e, no perfil metálico, foram mantidas as dimensões  $h$  e  $b_f$  da viga mista 2 (SP) e diminuídas as espessuras  $t_w$  e  $t_f$  para os mesmos valores da viga mista 5 (SP).

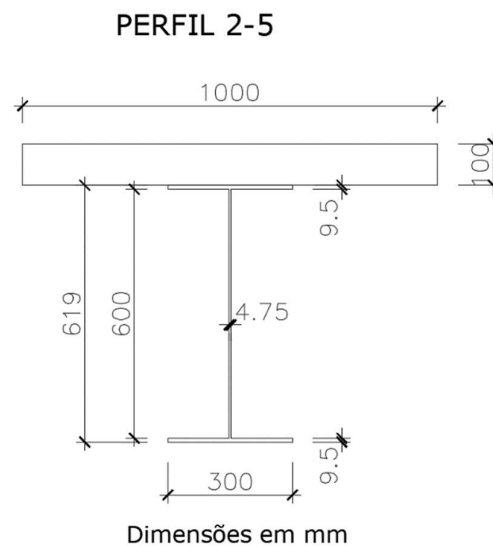


Figura 5.18: Dimensões, em mm, da seção transversal da viga mista 2-5 (SP).

A Tabela 5.10 mostra os valores do fator de massividade das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 2-5 (SP).

Tabela 5.10: Fator de massividade das partes e dos perfis das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 2-5 (SP).

Viga mista	Fator de massividade do perfil ( $m^{-1}$ )			
	Mesa superior	Mesa inferior	Alma	Perfil metálico
2 (SP)	46	86	250	110
5 (SP)	115	220	421	235
2-5 (SP)	110	216	421	249

Dessa forma, as temperaturas das partes do perfil dessas vigas foram comparadas durante o tempo de duração de incêndio, como mostrado na Figura 5.19.

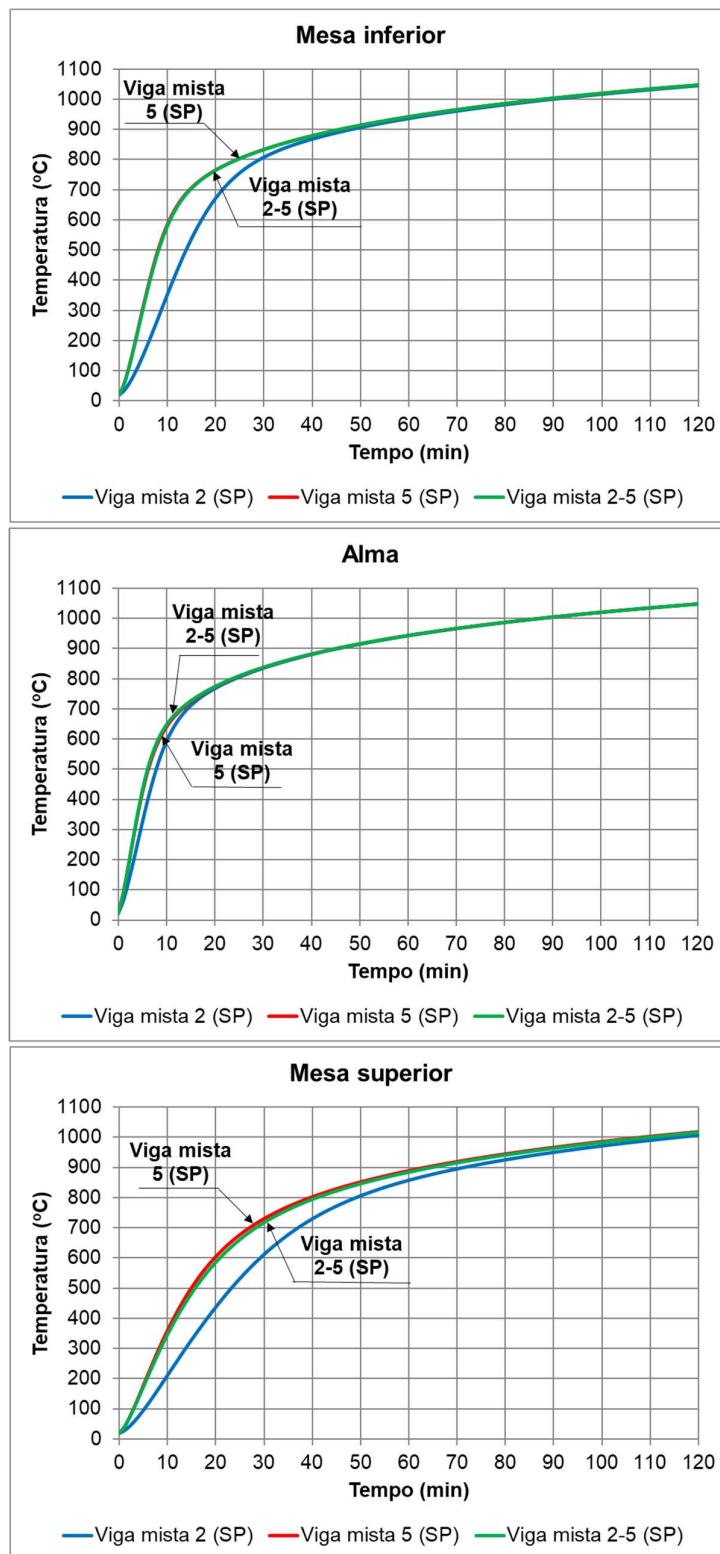


Figura 5.19: Curvas “temperatura x tempo” dos perfis das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 2-5 (SP).

A curva “temperatura x tempo” da viga mista 2-5 (SP) foi praticamente a mesma curva da viga 5 (SP) para qualquer parte do perfil. Isso mostra que a temperatura máxima atingida pelas partes do perfil depende, principalmente, das espessuras dos mesmos, enquanto a variação do comprimento pouco influencia nas temperaturas obtidas. É importante salientar que o fator de massividade da viga 2-5 (SP) é mais próximo da viga 5 (SP), ou seja, este é um parâmetro que serve de base para comparação na velocidade de aquecimento entre perfis metálicos das vigas mistas. Isso mostra também que as espessuras das partes do perfil influenciam de forma significativa no fator de massividade.

### 5.3.4 - Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto

Foi analisada a temperatura nos quatro tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos de duração de incêndio das lajes das três vigas mistas analisadas, com o objetivo de verificar a influência do fator de massividade e do comprimento da mesa superior na temperatura da laje. Os valores da temperatura para as duas seções analisadas de cada laje se encontram na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Temperatura uniforme nas seções das lajes de concreto das vigas mistas 2 (SP), 5 (SP) e 6 (SP).

Tempo (min)	Temperatura da laje (°C)					
	ABAQUS - Seção 1			ABAQUS - Seção 2		
	Viga mista 5 (SP) - perfil pequeno	Viga mista 6 (SP) - perfil médio	Viga mista 2 (SP) - perfil grande	Viga mista 5 (SP) - perfil pequeno	Viga mista 6 (SP) - perfil médio	Viga mista 2 (SP) - perfil grande
30	203	193	155	214	214	214
60	365	358	327	370	370	369
90	488	482	459	489	489	488
120	584	580	561	584	584	582

De acordo com a Tabela 5.11, na seção 1 da laje, as maiores temperaturas corresponderam ao perfil da viga mista 5 (SP), de maior fator de massividade e menores dimensões. Dessa forma, o tamanho do perfil metálico, principalmente o comprimento ( $b_f$ ) da mesa superior, influenciou na temperatura da região em que se encontra o conector de cisalhamento. Logo, quanto maior o fator de massividade do perfil, maior a temperatura no conector. As temperaturas máximas estão localizadas na seção 2, que se encontra em uma posição mais distante do eixo de simetria vertical

da viga mista. Estas temperaturas foram as mesmas para as vigas analisadas, mostrando que o tamanho e o fator de massividade do perfil metálico não influenciaram na temperatura máxima da laje.

A Figura 5.20 mostra o campo de temperaturas da seção transversal inteira para as vigas mistas analisadas, aos 30 minutos de incêndio.

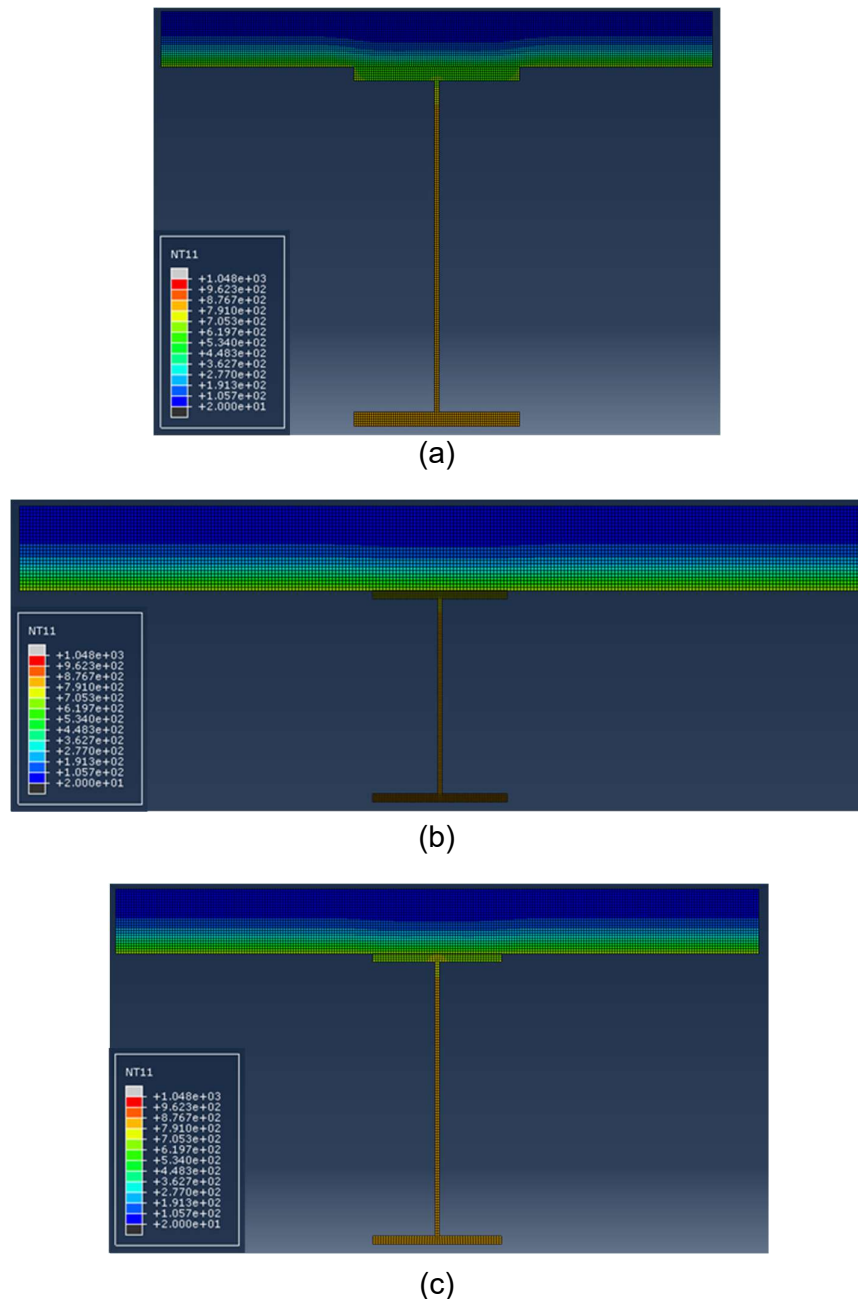


Figura 5.20: Gradiente de temperatura aos 30 minutos de incêndio das vigas mistas: (a) 2 (SP), (b) 5 (SP) e (c) 6 (SP).

Comparando o campo de temperaturas das lajes analisadas, no tempo de 30 minutos de incêndio, a viga mista 5 (SP), que possui um perfil com menor comprimento

da mesa superior, apresentou uma temperatura quase uniforme em toda a sua largura. Já na viga mista 6 (SP), que possui uma mesa superior com comprimento intermediário, houve uma descontinuidade do gradiente de temperatura na laje na região do conector. Esta descontinuidade foi mais evidente na viga mista 2 (SP). Isso mostra a influência do comprimento da mesa superior na temperatura na seção 1 da laje.

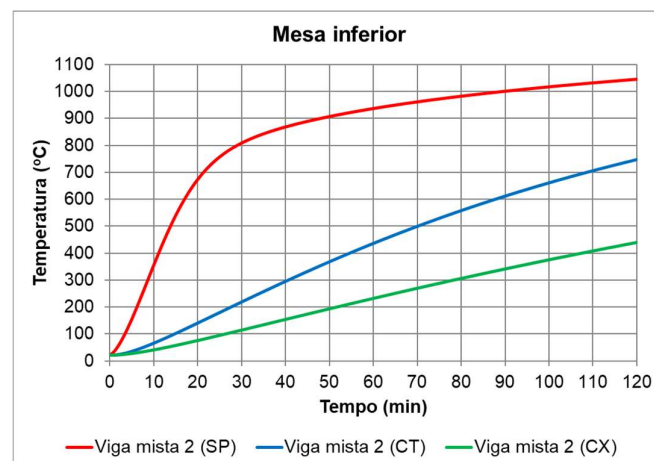
#### 5.4 - Análise de vigas mistas com material de proteção térmica

Esta análise tem como objetivo avaliar o desempenho térmico da viga mista revestida com material isolante e verificar qual dos dois tipos de proteção passiva, contorno ou caixa, é o mais eficiente para retardar a elevação da temperatura na viga mista. Além disso, foi verificado o tempo para que o aço com proteção comece a ter uma redução na sua resistência ao escoamento e foi analisada a influência da variação das propriedades do material de proteção térmica. Para esta análise, foi utilizado o programa ABAQUS para a modelagem numérica da viga mista 2.

##### 5.4.1 - Curvas “temperatura x tempo” das partes do perfil

###### a) Comparação entre os tipos de proteção em cada parte dos perfis metálicos

A viga mista 2 foi modelada sem proteção térmica e com proteção tipo contorno e tipo caixa, de forma a se obter o desenvolvimento da temperatura do perfil nessas situações e se avaliar o efeito que o tipo de proteção proporciona no retardamento de calor no aço. Na Figura 5.21, se encontram as curvas “temperatura x tempo” das partes do perfil metálico sem proteção, com proteção tipo contorno e tipo caixa.



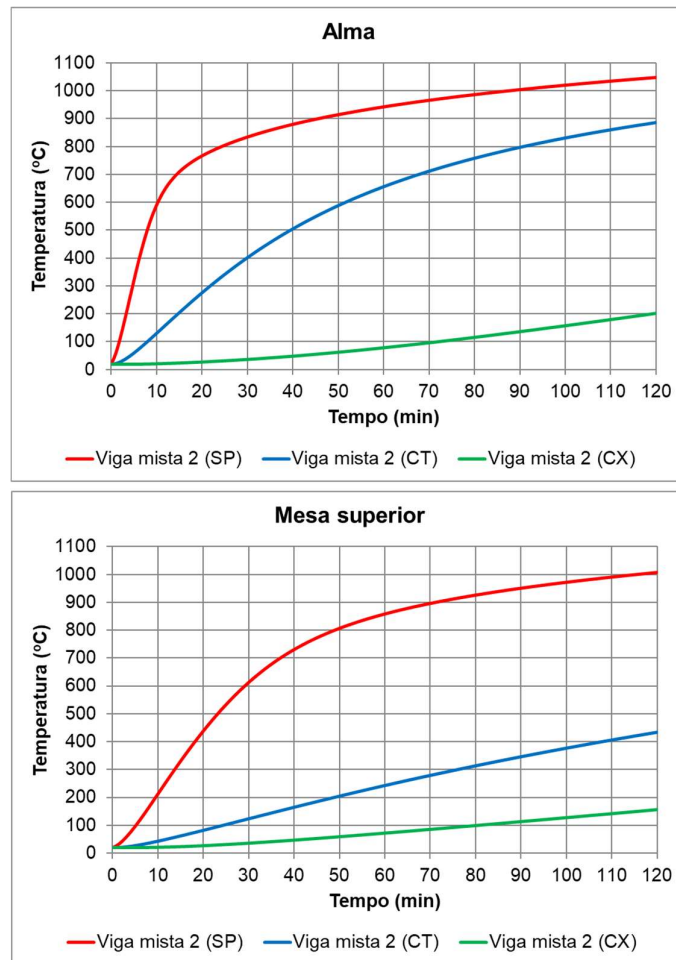


Figura 5.21: Curvas “temperatura x tempo” das partes viga mista 2 com e sem proteção.

A temperatura do perfil do aço pode aumentar rapidamente ou não, em função do grau de revestimento aplicado (ou sua inexistência). O uso do material isolante impediu um crescimento muito rápido da temperatura nos minutos iniciais, o que pode ser observado ao se comparar a inclinação das curvas “temperatura x tempo” do perfil com e sem proteção, e provocou uma diminuição da temperatura em todas as partes do perfil ao longo de todo tempo. Com proteção térmica do tipo contorno, a mesa superior apresentou uma queda de temperatura maior em relação à alma e à mesa inferior. A proteção térmica do tipo caixa apresentou a maior eficiência térmica, por garantir que a superfície atingida pelo fogo esteja afastada, em grande parte, do perfil metálico.

## b) Comparação entre os efeitos da proteção entre as partes de cada perfil

A Figura 5.22 mostra as curvas “temperatura x tempo” da viga mista 2 de acordo com a situação em que o perfil se encontra, ou seja, com e sem proteção, e isso permite comparar as temperaturas entre as partes do perfil.

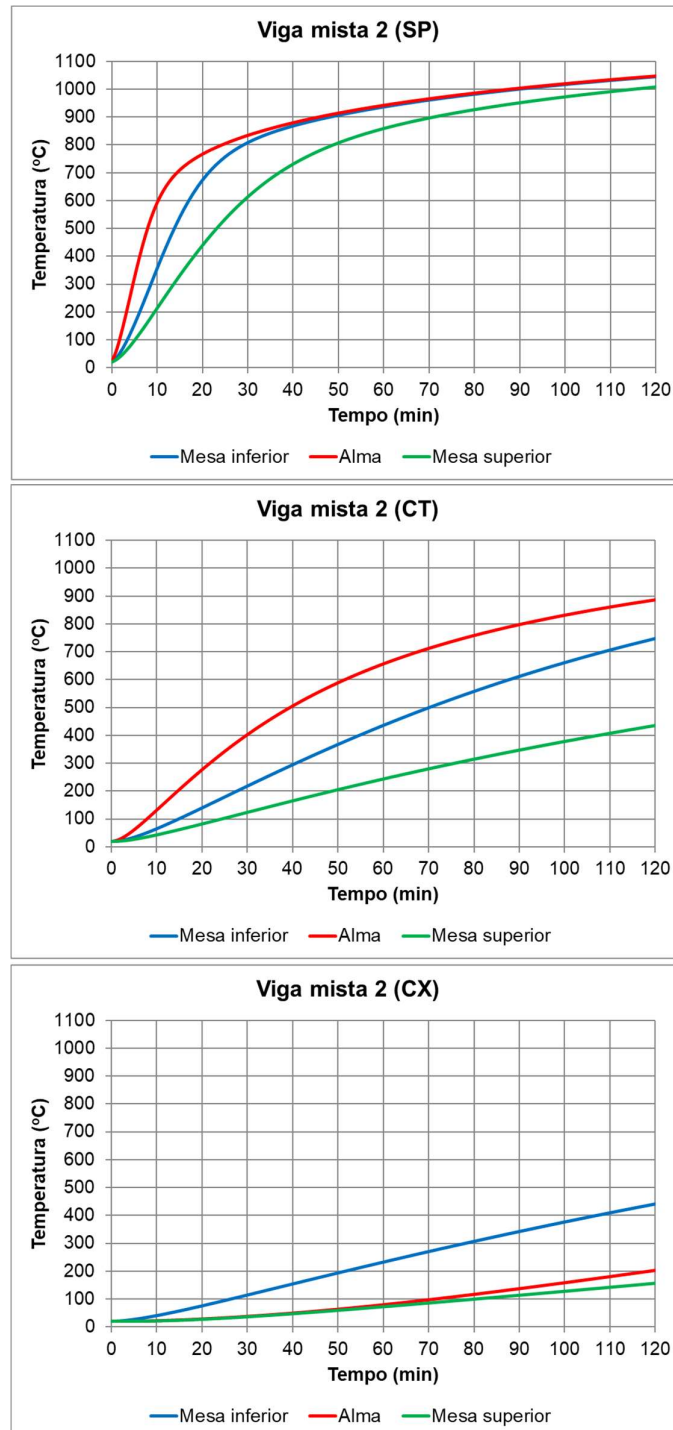


Figura 5.22: Curvas “temperatura x tempo” da viga mista 2 com e sem proteção.

Quando se utilizou a proteção do tipo contorno, a diferença entre as curvas “temperatura x tempo” de cada parte do perfil se tornou maior. A alma se manteve como a parte do perfil que tem uma elevação de temperatura mais rápida e atinge a temperatura máxima em qualquer tempo de incêndio, e a mesa superior como a parte que apresentou as menores temperaturas. A proteção tipo caixa proporcionou uma queda brusca de temperatura, e, nesse caso, a alma e a mesa superior apresentaram temperaturas muito próximas uma da outra em todo o tempo. A mesa inferior apresentou uma elevação de temperatura maior e apresentou a máxima temperatura atingida pelo perfil.

#### 5.4.2 - Temperatura uniforme nas seções da laje de concreto

Esta etapa permite analisar a temperatura uniforme da seção 1 da laje de concreto, região que se encontra o conector, quando se utiliza um mesmo perfil, porém, comparando os casos que apresentam ou não a proteção térmica, como mostra a Tabela 5.12. A seção 2 não foi analisada, pois a temperatura é a mesma independentemente das condições de contorno da viga mista e do tamanho do perfil de aço utilizado.

Tabela 5.12: Temperatura uniforme na seção 1 da laje de concreto da viga mista 2 com e sem proteção.

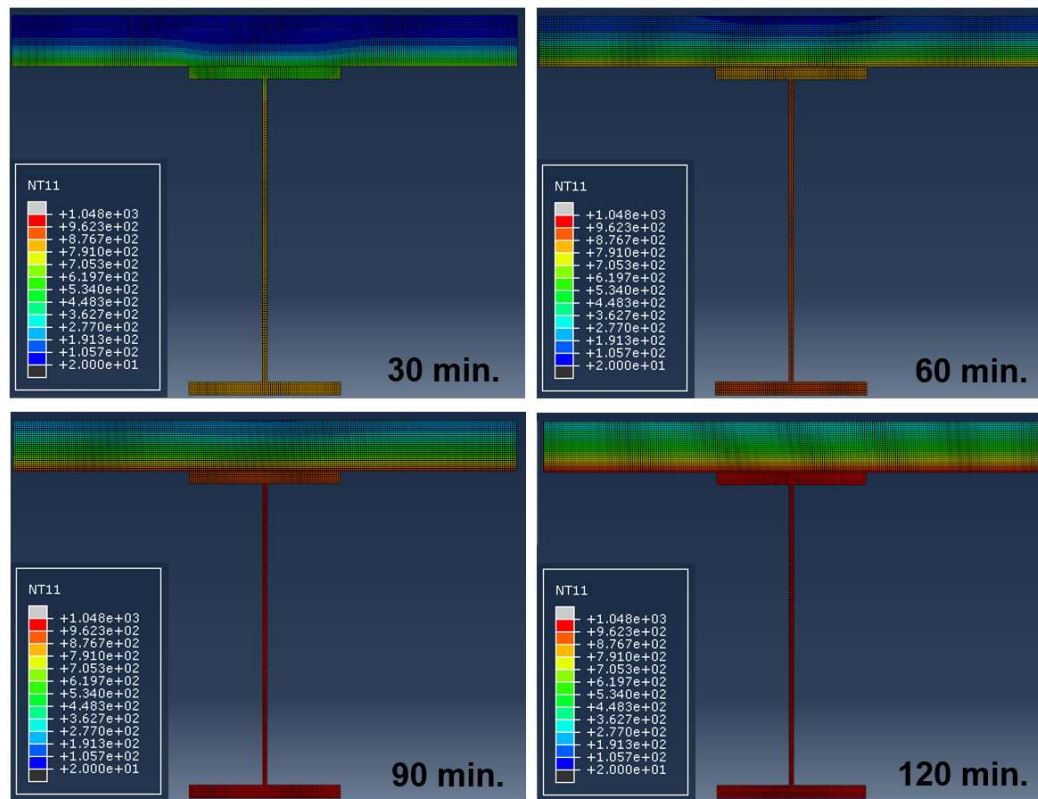
Tempo (min)	Temperatura da laje (°C) - Viga mista 2		
	ABAQUS - Seção 1		
	Sem proteção	Tipo contorno	Tipo caixa
30	155	41	23
60	327	88	35
90	459	146	55
120	561	209	81

A temperatura uniforme na seção 1 da laje foi maior para o perfil sem proteção e diminuiu com a presença da proteção térmica, conforme pode ser observado nas figuras do campo de temperaturas. Entre os tipos de proteção, o tipo caixa resultou em uma temperatura menor na laje do que a proteção tipo contorno. Logo, o uso da proteção térmica no perfil metálico proporciona uma redução na temperatura do conector de cisalhamento.

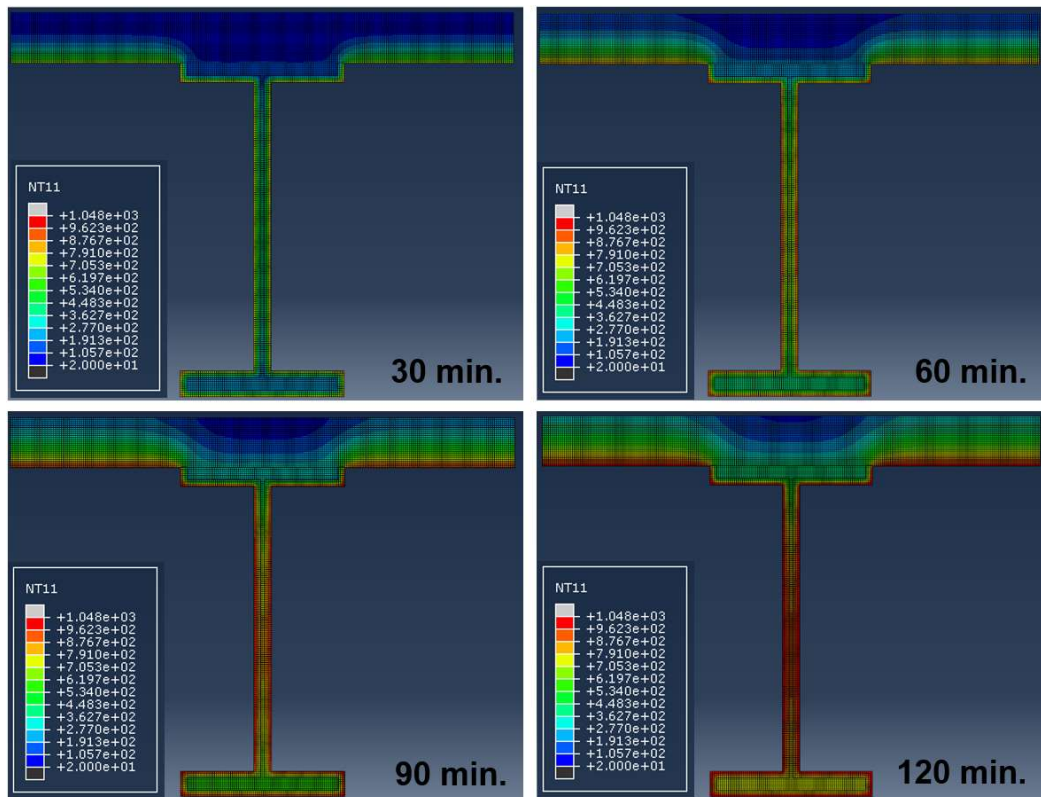


### 5.4.3 - Campo de temperaturas

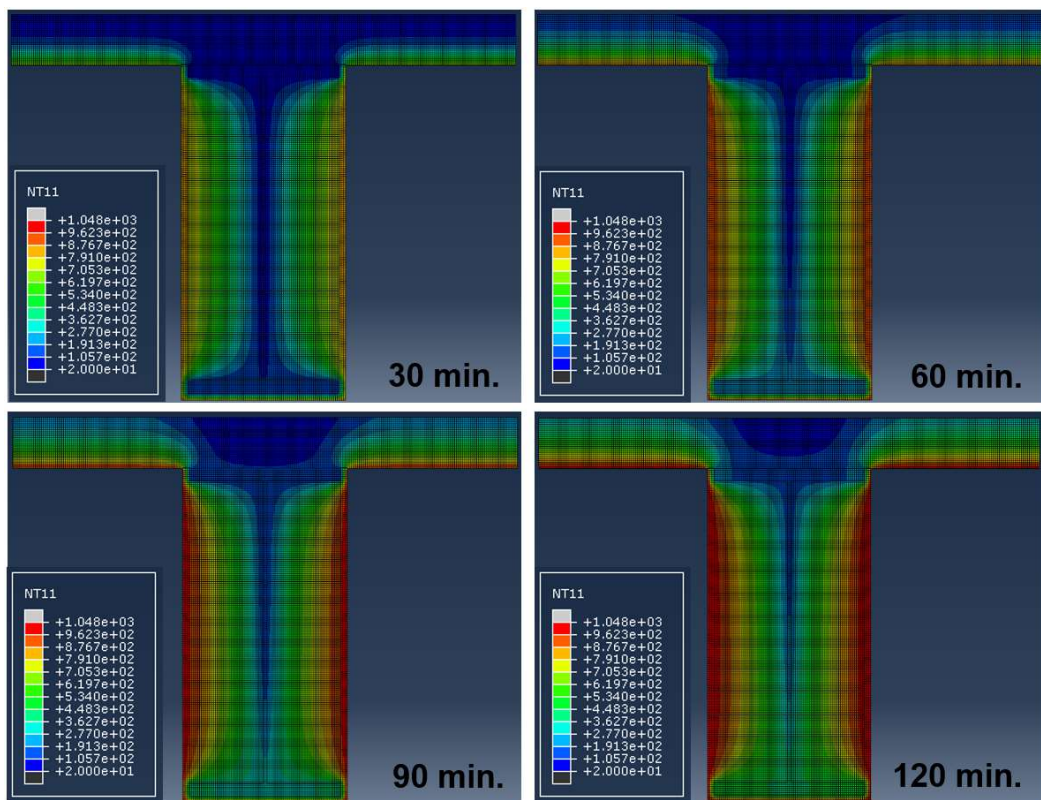
A comparação do campo de temperaturas da viga mista sem e com diferentes tipos de proteção térmica permite visualizar a distribuição do fluxo de calor em toda a seção mista e a eficiência que o material isolante proporciona ao sistema. A Figura 5.23 mostra os gradientes de temperatura nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos de incêndio da viga mista 2 sem proteção (a), com proteção tipo contorno (b) e com proteção tipo caixa (c). A diferença das cores do campo de temperaturas na seção mista pode ser visualizada melhor na figura do campo de temperatura para o TRRF de 60 minutos.



(a) perfil sem proteção térmica



(b) perfil com proteção térmica tipo contorno



(c) perfil com proteção térmica tipo caixa

Figura 5.23: Campo de temperaturas da viga mista 2: (a) sem proteção térmica, (b) com proteção tipo contorno e (c) com proteção tipo caixa nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos.

Para o TRRF de 60 minutos, praticamente não houve variação de temperatura ao longo da largura efetiva da laje de concreto, exceto na região imediatamente sobreposta à mesa superior da seção de aço, no caso do perfil revestido pelo material de proteção térmica. Entretanto, nesta região, onde se situa o conector de cisalhamento, não houve grandes variações térmicas ao longo da altura da laje. Este fato é importante caso um conector de cisalhamento fosse instalado ali, pois este atingiria temperaturas menores do que se fosse instalado em um perfil sem proteção. Em relação à seção de aço, observa-se como a faixa de variação de temperatura foi diferente em cada situação, mostrando que o material isolante contribuiu para retardar o aumento da temperatura. No perfil desprotegido, a faixa de variação da temperatura encontra-se entre o amarelo e laranja; já no perfil revestido com material de proteção tipo contorno, a faixa de variação da temperatura encontra-se entre o azul e o verde; por fim, no perfil revestido com material de proteção do tipo caixa, a faixa de variação da temperatura está entre o azul claro e o azul escuro. Isso mostra que a temperatura, na proteção tipo caixa, não apresentou-se uniforme ao longo da seção metálica.

#### **5.4.4 - Temperatura do início da redução da resistência**

Uma temperatura atingida pela viga mista pode ser considerada crítica quando leva o elemento estrutural ao colapso. Em uma análise mais rigorosa, pode-se estudar a temperatura no aço de forma que a resistência e a sollicitação de cálculo em situação de incêndio tornem-se iguais. Dessa forma, a temperatura crítica dependerá do tipo de sollicitação, das condições de contorno, da folga existente no dimensionamento à temperatura ambiente e das sollicitações de cálculo em temperatura elevada e à temperatura ambiente.

Conforme a Tabela 3.1, a temperatura de 400 °C é a temperatura máxima que o aço pode atingir para não haver redução na sua resistência ao escoamento. Com isso, será utilizada esta temperatura para comparação da eficiência da proteção no comportamento estrutural. A Tabela 5.13 mostra o tempo, em minutos, em que cada parte do perfil atinge 400 °C, com e sem proteção tipo contorno e tipo caixa. Os valores entre parênteses indicam quanto tempo a mais a proteção proporcionou ao aço até atingir a temperatura de 400 °C.

Tabela 5.13: Tempo em que as partes do perfil atingem a temperatura de 400 °C.

Situação	Tempo (min) em 400 °C		
	Mesa inferior	Alma	Mesa superior
Sem proteção	11	6	18
Tipo contorno	54	30	107
Tipo caixa	107	-	-

Quando o perfil não possui proteção térmica ou possui proteção do tipo contorno, a alma é a parte do perfil que atingiu 400 °C mais rapidamente e a mesa superior é a parte que mais demorou a atingir esta temperatura. Logo, a parte mais crítica do perfil é a alma, pois é a região onde o aço começará a perder a resistência ao escoamento. O uso da proteção térmica melhorou esse tempo de forma significativa. A maior eficiência da proteção tipo contorno ocorreu na mesa superior, que teve um aumento no tempo de 89 minutos, enquanto a maior eficiência da proteção tipo caixa ocorreu na alma e na mesa superior, nos quais não foi atingida a temperatura de 400 °C.

Como a viga mista é um trabalho em conjunto da viga de aço com a laje de concreto, é importante saber em quanto tempo o concreto começa a perder resistência característica à compressão. De acordo com a Tabela 3.2, o concreto começa a perder resistência em 100 °C. Dessa forma, a seção crítica da laje da viga mista 2 irá atingir essa temperatura em menos de 13 minutos. Quando a laje atingir a temperatura crítica do aço (400 °C), em menos de 68 minutos, o concreto terá somente 75% da sua resistência à compressão.

Dessa forma, nessa situação analisada, quando o perfil não possuir proteção térmica, o aço irá perder resistência primeiro que o concreto. Quando houver algum tipo de proteção, contorno ou caixa, o concreto irá perder a resistência característica à compressão antes do aço ter redução em sua resistência.

#### 5.4.5 - Variação das propriedades do material de proteção térmica

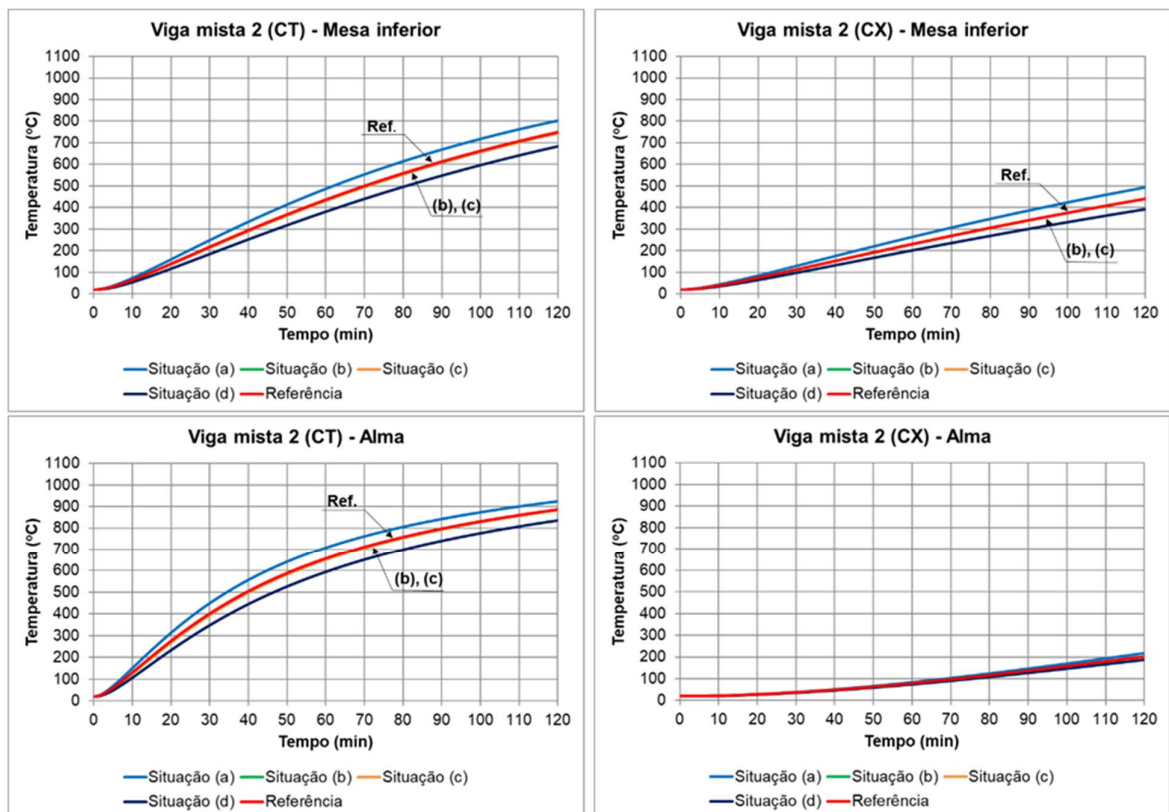
Esta etapa permite analisar a influência de cada propriedade do material da proteção térmica de forma individual. Para isso, foi utilizado a viga mista 2 como referência para os casos sem proteção, com proteção tipo contorno e com proteção tipo caixa. As situações analisadas tinham apenas uma propriedade alterada, com um aumento de 20% de seu valor. As situações analisadas são as seguintes: (a) aumento de 20% da condutividade térmica do material isolante; (b) aumento de 20% da massa

específica do material isolante; (c) aumento de 20% do calor específico do material isolante; (d) aumento de 20% da espessura do material isolante. A Tabela 5.14 mostra os valores de referência e das quatro situações analisadas.

Tabela 5.14: Valores das propriedades do material de proteção das situações analisadas.

Propriedades do material de proteção	Valores de referência	Situação (a)	Situação (b)	Situação (c)	Situação (d)
Condutividade térmica (W/m.°C)	0,135	0,162	0,135	0,135	0,135
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	320	320	384	320	320
Calor específico (J/Kg°C)	1100	1100	1100	1320	1100
Espessura (mm)	13	13	13	13	15,6

Os gráficos da Figura 5.24 mostram as curvas “temperatura x tempo” da situação de referência e das situações analisadas para as três partes do perfil metálico com proteção tipo contorno e tipo caixa.



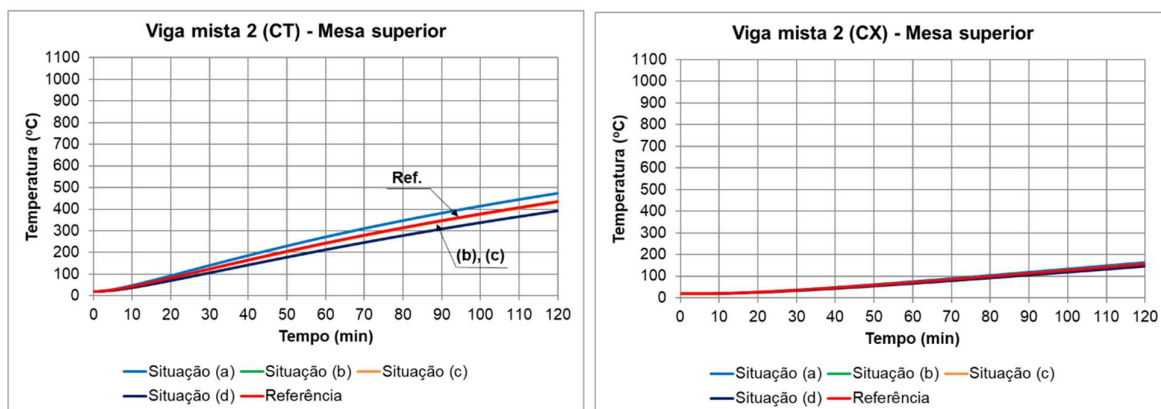


Figura 5.24: Curvas “temperatura x tempo” do perfil metálico da situação de referência e das situações analisadas com proteção tipo contorno e tipo caixa.

As Tabelas 5.15 e 5.16 mostram os valores das temperaturas nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos, de cada situação analisada e da referência, para as três partes do perfil metálico com proteção tipo contorno e tipo caixa, respectivamente.

Tabela 5.15: Valores das temperaturas do perfil metálico com proteção tipo contorno da situação de referência e das situações analisadas nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos.

MESA INFERIOR - TIPO CONTORNO					
Tempo (min)	Temperatura de referência (°C)	Situações analisadas			
		Situação (a)	Situação (b)	Situação (c)	Situação (d)
		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
30	218	249	215	215	185
60	436	488	432	432	381
90	612	670	608	608	548
120	748	803	745	745	683

ALMA - TIPO CONTORNO					
Tempo (min)	Temperatura de referência (°C)	Situações analisadas			
		Situação (a)	Situação (b)	Situação (c)	Situação (d)
		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
30	402	450	395	395	349
60	656	708	651	651	595
90	797	842	794	794	741
120	886	924	884	884	837

<b>MESA SUPERIOR - TIPO CONTORNO</b>					
<b>Tempo (min)</b>	<b>Temperatura de referência (°C)</b>	<b>Situações analisadas</b>			
		<b>Situação (a)</b>	<b>Situação (b)</b>	<b>Situação (c)</b>	<b>Situação (d)</b>
		<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
30	124	140	122	122	106
60	243	271	242	242	213
90	347	381	345	345	309
120	435	473	433	433	392

Tabela 5.16: Valores das temperaturas do perfil metálico com proteção tipo caixa da situação de referência e das situações analisadas nos tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos.

<b>MESA INFERIOR - TIPO CAIXA</b>					
<b>Tempo (min)</b>	<b>Temperatura de referência (°C)</b>	<b>Situações analisadas</b>			
		<b>Situação (a)</b>	<b>Situação (b)</b>	<b>Situação (c)</b>	<b>Situação (d)</b>
		<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
30	114	130	112	112	99
60	232	264	230	230	202
90	342	386	340	340	301
120	441	493	439	439	392

<b>ALMA - TIPO CAIXA</b>					
<b>Tempo (min)</b>	<b>Temperatura de referência (°C)</b>	<b>Situações analisadas</b>			
		<b>Situação (a)</b>	<b>Situação (b)</b>	<b>Situação (c)</b>	<b>Situação (d)</b>
		<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
30	37	38	37	37	35
60	79	84	78	78	74
90	137	146	135	135	126
120	202	218	201	201	186

<b>MESA SUPERIOR - TIPO CAIXA</b>					
<b>Tempo (min)</b>	<b>Temperatura de referência (°C)</b>	<b>Situações analisadas</b>			
		<b>Situação (a)</b>	<b>Situação (b)</b>	<b>Situação (c)</b>	<b>Situação (d)</b>
		<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
30	36	37	36	36	34
60	72	75	72	72	67
90	113	118	113	113	106
120	156	163	156	156	146

Para o perfil com proteção tipo contorno, na situação (a), quando o valor da condutividade térmica aumentou, a curva “temperatura x tempo” em todas as partes do perfil foi mais elevada, diferentemente das outras situações, quando a temperatura do perfil tendeu a diminuir com o aumento das propriedades. A diminuição de

temperatura mais significativa ocorreu na situação (d), quando houve uma variação na espessura da proteção. Nas situações (b) e (c), as curvas são muito próximas da curva de referência em todas as partes do perfil, ou seja, o aumento da massa específica e do calor específico gerou uma diminuição insignificante na temperatura em todas as partes do perfil, apresentando uma variação menor que 7 °C.

Em relação à proteção tipo caixa, a variação das propriedades teve uma influência da mesma forma que no uso da proteção tipo contorno. É possível observar uma maior influência das variações das propriedades do material de proteção na mesa inferior, onde a diferença entre as curvas “temperatura x tempo” das diferentes situações e de referência foi mais acentuada. Em relação à mesa superior e à alma, as alterações feitas em qualquer propriedade do material de proteção não resultaram em uma variação significativa na temperatura, apresentando uma variação menor que 2 °C.



## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Neste estudo, foram feitas análises térmicas de vigas mistas aço-concreto por meio da modelagem numérica e do cálculo simplificado proposto pela norma NBR 14323 (ABNT, 2013), tendo como principal objetivo a observação do desenvolvimento e do comportamento térmico da seção transversal mista, além da eficiência da proteção passiva. Para validar os modelos numéricos considerados neste projeto, espera-se obter resultados numéricos que se aproximem dos resultados obtidos de cálculos realizados de acordo com normas e, com isso, simular satisfatoriamente o comportamento térmico desses elementos em situação de incêndio.

Considerando esses resultados em conjunto, têm-se as seguintes conclusões para a análise do comportamento térmico:

- O campo de temperaturas não foi uniforme na seção mista durante o incêndio;
- O comportamento térmico desta análise permitiu identificar as regiões de temperatura máxima das partes da seção mista;
- O perfil metálico apresentou a maior temperatura da seção mista. Entre as partes do perfil, a temperatura máxima se encontra na alma;
- A laje de concreto funcionou como proteção térmica para a mesa superior, onde foi observada a menor temperatura do perfil;
- A temperatura máxima encontrada na mesa superior foi maior sem a presença do conector de cisalhamento, o que permitiu considerar que a situação de temperatura crítica da seção mista seja sem o conector.

Na comparação das temperaturas da seção mista obtidas por meio dos dois métodos de cálculo (ABAQUS e Norma Brasileira), foi importante verificar a influência do tamanho e da massa dos perfis metálicos e da laje de concreto. Dessa forma, têm-se as seguintes conclusões:

- Em todas as partes do perfil com e sem proteção térmica, a curva “temperatura x tempo” obtida pela modelagem no ABAQUS teve a mesma tendência da curva obtida por meio da norma NBR 14323 (ABNT, 2013) ao longo do período em que a viga mista estava exposta ao incêndio. Algumas curvas se aproximaram mais umas das outras e essa equivalência de resultados depende do tempo de incêndio, das dimensões do perfil e da presença de proteção térmica;

- As diferenças das temperaturas obtidas entre os dois métodos se devem ao fato de a Norma Brasileira apresentar fórmulas que constituem um método simplificado de análise térmica;
- Houve uma melhor concordância entre as curvas “temperatura x tempo” da alma de um perfil sem proteção térmica, obtidas pela norma e pela modelagem numérica, quando se alterou a fórmula do fator de massividade para o perfil sem proteção;
- É evidente que a maior discrepância entre as curvas ocorreu para o caso do perfil com proteção tipo caixa. Isso se deve pelo fato da norma apresentar equações que foram desenvolvidas admitindo uma distribuição de temperatura uniforme na peça de aço;
- Na laje de concreto, as temperaturas obtidas por meio do ABAQUS foram diferentes e, em geral, superiores às temperaturas obtidas por meio da Norma Brasileira. A temperatura uniforme da seção 1, obtida por meio do ABAQUS, depende da presença da proteção, que provocou uma diminuição da temperatura. No entanto, a seção 2 apresentou as maiores temperaturas, sendo considerada a seção crítica da laje, e apresentou as mesmas temperaturas independentemente das condições em que se encontrava o perfil metálico;
- De forma simplificada, a temperatura do conector pode ser considerada igual à da mesa superior.

Na comparação entre os métodos de cálculo incluindo os modelos numéricos que consideram as condições feitas pela Norma Brasileira, pode-se concluir que:

- Na modelagem numérica dos perfis sem proteção e com proteção tipo contorno, essas condições influenciam de forma mais significativa nas curvas na mesa superior. No entanto, no perfil com proteção tipo caixa, foi observado uma influência maior nos valores da temperatura da alma do perfil;
- A temperatura uniforme da seção 1 da laje teve uma diminuição considerável nessas condições, mostrando que a temperatura dessa região tem uma influência do calor que recebe do perfil metálico.
- Diante dos resultados obtidos, observa-se que as condições feitas pela Norma Brasileira não podem ser consideradas na modelagem numérica.

Com a criação do modelo numérico no ABAQUS com a variação das propriedades dos materiais aço e concreto, em função da temperatura, têm-se as seguintes conclusões:

- Não houve alterações significativas na curva “temperatura x tempo” do perfil metálico, no entanto, na laje de concreto, foi observado menores temperaturas uniformes nas duas seções analisadas. Isso fez com que as temperaturas da laje nessa situação se aproximassem das temperaturas obtidas pelo método da norma.

Na análise de vigas mistas sem material de proteção térmica, pode-se concluir que:

- O índice de aumento de temperatura do perfil de aço em incêndio é proporcional ao seu fator de massividade. Dessa forma, um fator de massividade maior provocou uma curva “temperatura x tempo” das partes do perfil mais inclinada;
- O fator de massividade de um perfil é inversamente proporcional a suas dimensões;
- As espessuras das partes do perfil foram as dimensões que influenciaram, de forma significativa, o fator de massividade;
- Perfis com maiores fatores de massividade apresentaram uma temperatura maior na seção 1 da laje de concreto. No entanto, a variação do fator de massividade não influencia na temperatura uniforme da seção crítica da laje.

Na análise de vigas mistas com material de proteção térmica, têm-se as seguintes conclusões:

- O uso dos dois tipos de proteção térmica, contorno ou caixa, foi eficiente para retardar o acesso do calor ao aço, principalmente o uso da proteção tipo caixa.
- A menor temperatura na mesa superior do perfil causada pelo uso do material isolante proporcionou uma menor temperatura na seção 1 da laje, região em que se situa o conector.
- A alteração das propriedades do material térmico teve uma influência maior nas curvas “temperatura x tempo” do perfil quando possui proteção tipo contorno;
- Com o objetivo de ter as menores temperaturas no aço, o ideal é utilizar materiais isolantes com maiores valores de massa específica, calor específico e espessura. No entanto, uma massa específica maior provoca um aumento do

peso da estrutura e um aumento da espessura pode gerar um custo maior de material.

Com essas análises realizadas, é possível obter conclusões mais satisfatórias tanto em relação à determinação da temperatura atingida pela viga mista como ao próprio dimensionamento em situação de incêndio. Conclui-se, finalmente, que o emprego do Método dos Elementos Finitos na simulação do comportamento térmico de vigas mistas em situação de incêndio, por meio do software ABAQUS, pode simular satisfatoriamente vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio, respeitando as condições do incêndio e de modelagem numérica citadas nesta dissertação.

Para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa, sugere-se dar continuidade à análise térmica das vigas mistas aço-concreto com fôrma de aço incorporada, com seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados e com outros tipos de seção, como seção tubular de forma circular ou retangular. Recomenda-se, também, realizar análises térmicas no software ABAQUS utilizando curvas parametrizadas do incêndio natural propostas pelo Eurocode e associar aos resultados obtidos com as curvas do incêndio-padrão. É importante desenvolver pesquisas de análise térmica e estrutural acopladas de vigas mistas aço-concreto, observando a capacidade resistente com e sem a presença de proteção térmica, e tirar conclusões sobre as ações que provavelmente causariam o colapso do elemento estrutural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, G.M.S. (2000). *Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 277p

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (2005). AISC-LRFD - Load and resistance factor design. Chicago.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001) Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo: NBR 5628. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013) Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais: NBR 5884. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986) Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios – Procedimento: NBR 8800. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008) Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios: NBR 8800. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1999) Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento: NBR 14323. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013) Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio – Procedimento: NBR 14323. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001) Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento: NBR 14432. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001) Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento: NBR 14762. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012) Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: NBR 15200. Rio de Janeiro.

BABA, S.; NAGURA, H. (1985). *Effect of material properties on the deformation of steel frames in fire*. Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 2, N° 1, p. 47-57.

BATHE, K.J. (1996). *Finite element procedures*. New Jersey: Prentice Hall.

BURGESS, I. W.; EL-RIMAWI, J. A.; PLANK, R. J. (1990). *Analysis of beams with non-uniform temperature profile due to fire exposure*. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 16, p. 169-192.

CALMON, J. L.; SILVA, C. J.; MIRAMBELL, E. (2000). *Análise térmica bidimensional em regime transiente pelo método dos elementos finitos – Aplicação às estruturas de concreto de alto desempenho*. In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2000, São Paulo. Anais: V Simpósio Epusp sobre Estruturas de Concreto. São Paulo.

CAVALCANTI, L. A. (2010). *Estudo teórico-experimental da contribuição da armadura para a capacidade resistente de vigas parcialmente revestidas*. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 150p.

CAZELI, R.; VILA REAL, P.M.M.; SILVA, V.P.; PILOTO, P.A.G. (2001). *Análise numérica de vigas “I” de aço em situação de incêndio, sujeitas à flambagem lateral. Contribuição para a validação de uma proposta de revisão do Eurocode 3 - Parte 1.2*. Apresentado ao IV Seminário Internacional “O uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil”/ I Congresso Internacional da Construção Metálica (I CICOM), São Paulo, 2001.

CHAPMAN, J. C., BALAKRISHNAN, S. (1964). *Experiments on composite beams*. The Structural Engineer, v. 42, n. 11, p. 369 – 383.

DAVIES, C. (1969). *Tests on half – scale steel – concrete composite beams with welded stud connectors*. The Structural Engineer, v. 47, n.1, p. 29 – 40.

DORR, J. B. (2010). *Modelos numéricos de pilares de aço em situação de incêndio considerando a influência da restrição axial*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 210p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2002). EN 1991-1-2: Eurocode 1 – Action on structures. Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1993). EN 1993-1-2: Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1993). EN 1994-1-2: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels.

FISCHER, E.C.; VARMA, A.H. (2015). *Fire behavior of composite beams with simple connections: Benchmarking of numerical models*. Journal of Constructional Steel Research, v.111, p.112-125.

- GHOJEL, J. I. (1998). *A new approach to modeling heat transfer in compartment fires*. Fire Safety Journal 31. p. 227-237. Elsevier Science Ltd.
- HUANG, Z.; BURGESS, I.W.; PLANK, R.J. (1999). *The influence of shear connectors on the behavior of composite steel-framed building in fire*. Journal of Constructional Steel Research, v.51, p.219-237.
- HUANG, H. C.; USMANI, A.S.. (1994) *Finite element analysis for heat transfer: theory and software*. Springer-Verlag. 199p.
- JAIN, P.C.; RAO, M.N.G. (1983). *Analysis of steel frames under fire environment*. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 19, p. 1467-1478.
- JONHSON, R.P. (1981). *Loss of interaction in short-span composite beams and plates*. Journal of Constructional Steel Research, v.1, n.2, p.11-16.
- KIMURA, E. F. A. (2009). *Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 225p.
- KIRCHHOF, L. D. (2004). *Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 143p
- LAMONT. S. (2001). *The Behaviour of Multi-storey Composite Steel Framed Structures in Response to Compartment Fires*. Tese (Doutorado). University of Edinburgh. 392p.
- LEWIS, R.W., NITHIARASU, P. e SEETHARAMU, K.N. (2004) *Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow*. Wiley. 341p.
- LIE, T.T. (1994). *Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete*. Journal of Structural Engineering. Vol. 120, p. 1489-1509.
- MAKELAINEN, P.; MA, Z. (2000). *Fire resistance of composite slim floor beams*. Journal of Constructional Steel Research. v.54, p.345-363.
- MALITE, M. (1990). *Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 144p.
- MELÃO, A. R. (2016). *Sobre perfis I de aço em situação de incêndio paramétrico*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 214p.
- MENDES, C. L. (2004). *Estudo sobre perfis formados a frio em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 160p.

- OEHLERS, D.J.; COUGHLAN, C.G. (1986). *The shear stiffness of stud shear connectors in composite beams*. Journal of Constructional Steel Research. v.6, n.4, p.273-284.
- OEHLERS, D.J. (1989). *Splitting induced by shear connectors in composite beams*. Journal of Structural Engineering. v.115, n.2, p.341-362.
- OEHLERS, D.J., PARK, S.M. (1992). *Shear connectors in composite beams with longitudinally cracked slabs*. Journal of Constructional Steel Research, v.118, n.8, p.2004-2022.
- OEHLERS, D.J.; NGUYEN, N.T.; AHMED, M.; BRADFORD, M.A. (1997). *Partial Interaction in Composite Steel and Concrete Beams with Full Shear Connection*. Journal of Constructional Steel Research, v.41, n.2/3, p.235-248.
- OLAWALE, A. O. (1988). *Collapse behavior of steel columns in fire*. Thesis (Ph.D). Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield. 189p.
- PANNONI, F. D. (2015). *Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio*, 6ª edição, Gerdau, 97p.
- PANNONI, F. D. Proteção de Estruturas Metálicas Frente ao Fogo. Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/protacao-de-estruturas-metalicas-frente-ao-fogo>>. Acesso em: 18 mar. 2017.
- PITANGA, M.A. (2004). *Análise térmica de vigas mistas aço-concreto em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE. 152p.
- POH, K. W.; BENNETTS, I D. (1995a). *Analysis of structural members under elevated temperature conditions*. Journal of Structural Engineering. Vol. 121, p. 664-675.
- POH, K. W.; BENNETTS, I. D. (1995b). *Behavior of steel columns at elevated temperatures*. Journal of Structural Engineering. Vol. 121, p. 676-684.
- REGOBELLO, R. (2007). *Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 254p.
- RIBEIRO, J, C. L. (2004). *Simulação via método dos elementos finitos da distribuição tridimensional de temperatura em estruturas em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 178p.
- ROCHA, P.A.S.; DA SILVA, K.L. (2016). *Estudo do desempenho de vigas em situação de incêndio a partir do modelo de fibras*. Métodos numéricos para Cálculo y Diseño em Ingeniería, v.175.



- RODRIGUES, L. D. T. (2013). *Determinação numérica e analítica da carga crítica uniformemente distribuída de vigas de aço em situação de incêndio natural*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília. 251p.
- SAKUMOTO, Y. (1999). *Research on new fire-protection materials and fire-safe design*. Journal of Structural Engineering. Vol. 125, p. 1415-1422.
- SAKUMOTO, Y.; NAKAZATO, T.; MATSUZAKI, A. (1996). *High temperature properties of stainless steel for buildings structures*. Journal of Structural Engineering. Vol. 122, p. 399-406.
- SAKUMOTO, Y.; SAITO, H. (1995). *Fire-safe design of modern steel building in Japan*. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 33, p. 101-123.
- SAKUMOTO, Y.; YAMAGUCHI, T.; OHASHI, M.; SAITO, H. (1992). *High temperature properties of fire resistant steel for buildings*. Journal of Structural Engineering. Vol. 118, p. 392-407.
- SANAD, A.M.; ROTTER, J.M.; USMANI, A.S.; O'CONNOR, M.A. (2000). *Composite beams in large buildings under fire-numerical modeling and structural behaviour*. Fire Safety Journal. V.35, p.165-188.
- SANTOS, R.T. (2009). *Modelos numéricos de pilares mistos curtos de seções circulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 155p.
- SANTOS, D.B.R. (2014). *Modelagem numérica de lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 243p.
- SILVA, V. P. (1997). *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 170p.
- SILVA, C.J. (2002). *Comportamento de estruturas metálicas e mistas em situação de incêndio. Modelagem e aplicações*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 191p.
- SIMULIA: ABAQUS Software. Version 6.14. Dassault Systèmes, 2014.
- SPÍNDOLA, C. C.; FAKURY, R. H. (2002). *Dimensionamento de pisos mistos em situação de incêndio com proteção apenas das vigas principais*. II Congresso Internacional de Construção Metálica – II CICOM, São Paulo, SP-Brasil, Novembro.
- TRISTÃO, G.A. (2002). *Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 126p.

VILA REAL, P. (2003). *Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural*. Edições Orion. Mafra.

VULCAN. Software Documentation, Versão 12.1.1. Vulcan Solutions Ltd, 2016.

WAINMAN, D.E., KIRBY, B.R. (1988). *Compendium of UK standard fire test data, unprotected structural steel - 1*. Ref. No. RS/RSC/S10328/1/87/B. Rotherham (UK): Swinden Laboratories, British Steel Corporation.

WANG, A.J. (2012). *Studies on semi-continuous composite beams with non-uniform fire protection*. The Institution of Engineers, v.13(1), p.29.

WANG, Y.C. (1998). *Composite beams with partial fire protection*. Fire Safety Journal. V.30, p.315-332.

WANG, Y.C. (2002). *Steel and Composite Structures - Behaviour and Design for Fire Safety*. Spon Press, London.

WONG, M.B.; GHOJEL. J.I. (2003). *Sensitivity analysis of heat transfer formulations for insulated structural steel components*. Fire Safety Journal. Vol. 38, p. 187-201.

YAM, L.C.P.; CHAPMAN, J.C. (1968). *The inelastic behaviour of simply supported composite beams of steel and concrete*. Inst. Civ. Engr. Proc. v.41, p.651-683.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. (1991) *The finite element method*, 4th ed London, v. 2, McGraw-Hill. 459p.

## ANEXO A - Equações básicas do MEF na transferência de calor

A determinação do campo de temperaturas no elemento estrutural é o primeiro passo para a análise de estruturas em situação de incêndio. A distribuição de temperaturas influencia a distribuição de tensões no elemento estrutural.

O calor propaga-se no aço por condução, cujo fenômeno é regido pela equação diferencial da condução de calor que, para domínios bidimensionais, é dada da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

em que  $\lambda_x$  e  $\lambda_y$  são as condutividades térmicas do material nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente,  $\dot{Q}$  é o calor gerado internamente por unidade de volume e de tempo,  $\rho$  é a massa específica,  $c$  é o calor específico,  $\theta$  é a temperatura e  $t$  é o tempo.

Para materiais isotrópicos, tais como o aço e o concreto, a condutividade térmica não varia em função das direções  $x$  e  $y$ , ou seja:

$$\lambda = \lambda_x = \lambda_y \quad (\text{A.2})$$

A expressão (A.1) é a forma geral em coordenadas cartesianas da equação de difusão do calor, ou simplesmente equação do calor. A partir dessa expressão pode-se obter a distribuição de temperatura em um meio contínuo bidimensional. Para resolvê-la, é necessário impor as condições de contorno e as condições iniciais no modelo matemático. As condições gerais de contorno nas quais se encontra uma estrutura podem ser:

- Condição de Dirichlet: fixa a temperatura  $\theta$  a um valor previamente conhecido sobre um contorno particular;
- Condição de Neumann: supõe que seja conhecido o fluxo de calor,  $\dot{q}$ , em uma parte do contorno em todo o instante. Matematicamente, esta condição pode ser representada pela equação seguinte, ou seja, a derivada do campo de temperaturas em relação à normal à superfície no contorno,  $n$ .

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = \dot{q} \quad (\text{A.3})$$

Uma superfície com condição adiabática ou isolada termicamente pode ser simulada por meio da imposição de um fluxo nulo ( $\dot{q} = 0$ ).

Os fenômenos de convecção são incluídos no modelo numérico por meio da condição de contorno de Neumann, que pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha_c (\theta - \theta_\infty) \quad (\text{A.4})$$

em que  $\alpha_c$  é o coeficiente de convecção e  $\theta_\infty$  é a temperatura do fluido externo.

Segundo BATHE (1996), a condição de temperatura prescrita em uma parte do contorno pode ser simulada por meio de um coeficiente de convecção bem maior do que o coeficiente de condução do material. Dessa maneira, a temperatura prescrita no nó será igual à temperatura do fluido adjacente ao nó.

### A.1 - Formulação para o MEF

A equação A.1 pode ser resolvida por métodos analíticos, gráficos ou numéricos.

O método analítico envolve a elaboração de uma solução exata; entretanto, embora várias técnicas estejam disponíveis para solução da equação, estas técnicas envolvem, com frequência, séries e funções matemáticas complicadas, que só podem ser obtidas para um conjunto restrito de geometrias e condições de contorno mais simples.

Os métodos gráfico e numérico geram resultados aproximados; contudo, o método numérico, além de se adaptar bem a geometrias e condições de contorno complexas, pode apresentar resultados bastante precisos.

A solução da equação diferencial (A.1) pode ser obtida numericamente por meio do MEF. O que se pretende descobrir é a função  $\theta = \theta(x, y, t)$  que satisfaça a equação do calor quando sujeita às condições inicial e de contorno. A aplicação do método dos elementos finitos exige como ponto de partida a existência de uma forma integral que expresse o mecanismo global do sistema. Para a utilização do MEF é necessário escrever a formulação fraca do problema, a qual é obtida por meio da seguinte forma:

$$\int_{\Omega} w \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad (\text{A.5})$$

onde  $w$  é uma função arbitrária denominada de função peso e  $\Omega$  é o domínio do problema.

Integrando por partes os dois primeiros termos da equação (A.5), se obtém a seguinte equação:

$$\int_{\Omega} w \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right] d\Omega = \int_S \left( w \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} l + w \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} m \right) dS - \int_{\Omega} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) d\Omega \quad (\text{A.6})$$

onde  $S$  representa a região de contorno do problema e  $l$  e  $m$  são os cossenos diretores da normal ao contorno.

Substituindo a equação (A.6) em (A.5), tem-se a seguinte equação:

$$\int_{\Omega} w \dot{Q} d\Omega - \int_{\Omega} w \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} d\Omega + \int_S \left( w \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} l + w \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} m \right) dS - \int_{\Omega} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) d\Omega = 0 \quad (\text{A.7})$$

Discretizando o domínio do problema em um número finito de elementos e utilizando-se no Método de Galerkin o conjunto de funções de interpolação  $N_i$  como funções peso. Assim, a temperatura em qualquer ponto no interior do elemento finito pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$\theta(x, y, t) = \sum_i^n N_i \theta_i \quad (\text{A.8})$$

onde  $n$  é o número de nós do elemento,  $N_i = N_i(x, y)$  são as funções de interpolação e  $\theta_i$  são as temperaturas nodais do elemento.

Substituindo a equação (A.8) em (A.7), chega-se no sistema de equações seguinte, que representa o equilíbrio térmico em cada elemento finito.

$$- \int_{A_e} \left[ \lambda \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \lambda \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} - N_i \dot{Q} + N_i \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] dA_e + \int_{S_e} N_i \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} l dS_e + \int_{S_e} N_i \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} m dS_e = 0$$

para  $i = 1$  até  $n$  (A.9)

onde  $A_e$  e  $S_e$  representam a área e a superfície do domínio do elemento

A derivada do campo de temperaturas em relação à normal à superfície no contorno,  $n$ , pode ser escrita em função dos co-senos diretores,  $l$  e  $m$ , por meio da seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = \frac{\partial \theta}{\partial x} l + \frac{\partial \theta}{\partial y} m \quad (\text{A.10})$$

Substituindo as equações (A.4) e (A.10) na equação (A.9), se obtém a seguinte expressão:

$$\int_{A_e} N_i \dot{Q} dA_e - \int_{A_e} N_i \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} dA_e - \int_{A_e} \left[ \lambda \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \lambda \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] dA_e - \int_{S_e} N_i \alpha_c (\theta - \theta_\infty) dS_e = 0 \quad (\text{A.11})$$

Define-se a matriz de funções de interpolação  $N$  e o vetor de temperaturas nodais por meio das seguintes expressões:

$$N = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_{n-1} \quad N_n] \quad (\text{A.12a})$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_{n-1} \quad \theta_n]^T \quad (\text{A.12b})$$

onde  $n$  é o número de nós do elemento e  $N_i$  são as funções de interpolação do elemento finito.

Assim, pode-se reescrever a equação (A.8) sob forma matricial por meio da seguinte equação:

$$\theta(x, y, t) = \sum_i^n N_i \theta_i = N\theta \quad (\text{A.13})$$

Define-se também a matriz de condutividade do material, para o caso de material isótropo e o vetor gradiente, pelas seguintes expressões:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$\nabla = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{array} \right\} \quad (\text{A.15})$$

Inserindo-se as expressões (A.12) a (A.15) na equação (A.11) e rearranjando os termos, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\int_{A_e} N^T \rho c N \frac{\partial \theta}{\partial t} dA_e + \int_{A_e} (\nabla N)^T \lambda \nabla N \theta dA_e + \int_{S_e} N^T \alpha_c N \theta dS_e = \int_{A_e} N^T \dot{Q} dA_e + \int_{S_e} N^T \alpha_c \theta_\infty dS_e \quad (\text{A.16})$$

O sistema de equações (A.16) pode ser reescrito de forma matricial por meio da seguinte expressão:

$$C \dot{\theta} + K \theta = F \quad (\text{A.17})$$

onde  $\dot{\theta}$  é a primeira derivada do campo de temperaturas em relação ao tempo ( $\dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$ ).

A matriz de capacitância total ( $K$ ) do elemento é dada da seguinte maneira:

$$K = K_{cond} + K_{conv} \quad (\text{A.18})$$

onde a matriz de condutividade do elemento é dada por:

$$K_{cond} = \int_{A_e} B^T \lambda B dA_e \quad (\text{A.19})$$

em que

$$B = \nabla N \quad (\text{A.20})$$

e a matriz de convecção do elemento é dada pela por:

$$K_{conv} = \int_{S_e} N^T \alpha_c N \theta dS_e \quad (\text{A.21})$$

em que  $\alpha_c$  é o coeficiente de convecção.

A matriz de capacidade térmica ( $C$ ) do elemento é dada da seguinte forma:

$$C = \int_{A_e} N^T \rho c N dA_e \quad (\text{A.22})$$

onde  $\rho$  é a massa específica e  $c$  é o calor específico.

O vetor de ações térmicas consistentes ( $F$ ) é dado pela seguinte expressão:

$$F = \int_{A_e} N^T \dot{Q} dA_e + \int_{S_e} N^T \alpha_c \theta_\infty dS_e \quad (\text{A.23})$$

em que  $\theta_\infty$  é a temperatura do fluido externo ao elemento.

As matrizes  $N$  e  $B$  dependem do tipo de elemento utilizado na discretização da estrutura.

## A.2 - Integração Temporal

O sistema de equações (A.17) representa equações diferenciais ordinárias dependentes do tempo. A solução transiente dessa equação pode ser obtida por meio dos Métodos de Integração Direta, tais como os Métodos- $\alpha$  (ZIENKIEWICZ E TAYLOR (1991), LEWIS *et al* (2004) e BATHE (1996)), cuja principal característica é a discretização da resposta no tempo em intervalos regulares, como mostra a Figura A.1.

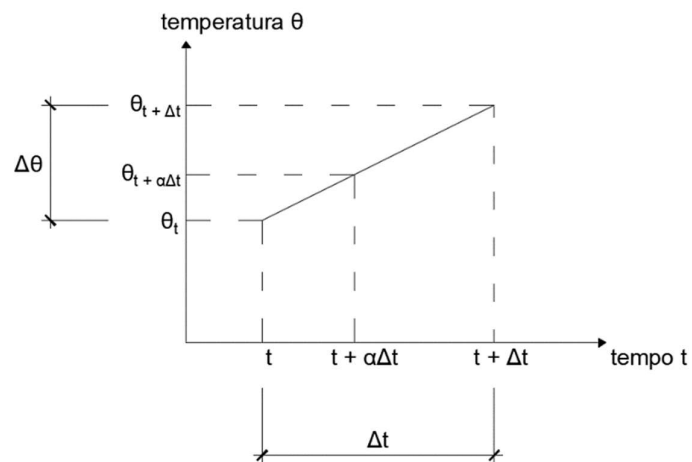


Figura A.1: Métodos- $\alpha$  para a integração direta no tempo.

A equação (A.17) deve ser satisfeita a cada instante discreto, sendo usualmente escrita no instante  $t + \alpha\Delta t$  conforme mostra a seguinte equação:

$$C \dot{\theta}_{t+\alpha\Delta t} + K \theta_{t+\alpha\Delta t} = F_{t+\alpha\Delta t} \quad (\text{A.24})$$



Utilizando as séries de Taylor, pode-se escrever a temperatura no tempo por meio da seguinte equação:

$$\theta_{t+\alpha\Delta t} = \theta_t + \Delta t \frac{\partial \theta_{t+\alpha\Delta t}}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 \theta_{t+\alpha\Delta t}}{\partial t^2} + \dots \quad (\text{A.25})$$

Desprezando os termos de ordens superiores, a primeira derivada do campo de temperaturas em relação ao tempo é dada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial \theta_{t+\alpha\Delta t}}{\partial t} \approx \frac{\theta_{t+\alpha\Delta t} - \theta_t}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad (\text{A.26})$$

Utilizando os Métodos- $\alpha$  (BATHE, 1996), a temperatura no instante  $t + \alpha\Delta t$  é obtida pela seguinte equação:

$$\theta_{t+\alpha\Delta t} = (1 - \alpha)\theta_t + \alpha\theta_{t+\Delta t} \quad (\text{A.27})$$

Analogamente, pode-se escrever o vetor de ações térmicas no instante  $t + \alpha\Delta t$  por meio da equação seguinte:

$$F_{t+\alpha\Delta t} = (1 - \alpha)F_t + \alpha F_{t+\Delta t} \quad (\text{A.28})$$

Substituindo-se as equações (A.26), (A.27) e (A.28) na equação (A.24) e desprezando o termo  $O(\Delta t)$ , obtém-se a seguinte equação:

$$C \left( \frac{\theta_{t+\Delta t} - \theta_t}{\Delta t} \right) + K(\alpha\theta_{t+\Delta t} + (1 - \alpha)\theta_t) = \alpha F_{t+\Delta t} + (1 - \alpha)F_t \quad (\text{A.29})$$

Multiplicando a equação (A.29) por  $\Delta t$  e após algumas manipulações algébricas, obtém-se a seguinte equação:

$$K_{ef}\theta_{t+\Delta t} = F_{ef} \quad (\text{A.30})$$

onde

$$K_{ef} = C + \alpha\Delta t K \quad (\text{A.31})$$

$$F_{ef} = [C - (1 - \alpha)\Delta t K]\theta_t + \Delta t[(1 - \alpha)F_t + \alpha F_{t+\Delta t}] \quad (\text{A.32})$$

O Método- $\alpha$  recebe uma denominação diferente de acordo com o valor de  $\alpha$ :

- a) esquema explícito de Euler:  $\alpha = 0$
- b) esquema implícito de Crank-Nicolson:  $\alpha = 1/2$
- c) esquema implícito de Galerkin:  $\alpha = 2/3$
- d) esquema implícito de Euler-Backward:  $\alpha = 1,0$

Segundo a estabilidade numérica, os métodos de integração direta são classificados em:

(i) incondicionalmente estáveis: quando a solução não crescer indefinidamente para quaisquer condições iniciais, isto é, quando for limitada para qualquer intervalo de tempo;

(ii) condicionalmente estáveis: quando a solução for limitada apenas para intervalos de tempo menor do que um certo valor chamado limite de estabilidade.

Nos Métodos- $\alpha$ , os que apresentam  $\alpha \geq 0,5$  são incondicionalmente estáveis.

Para garantir a convergência correta da solução, HUANG E USMANI (1994) e LEWIS *et al* (2004) recomendam que o intervalo de tempo a ser utilizado seja dado pela seguinte inequação:

$$\Delta t \leq \frac{\rho c}{\lambda} l^2 \quad (\text{A.33})$$

onde  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  são, respectivamente, a massa específica, o calor específico e a condutividade térmica do material e  $l$ , a menor dimensão do elemento finito.

### A.3 - Não Linearidade do Material

Uma vez que as matrizes  $C$ ,  $K$  e o vetor de ações térmicas  $F$  são dependentes da temperatura, a equação (A.30) torna-se não linear, devendo-se aplicar um método incremental e iterativo para se obter a solução do problema, como o método de Newton-Raphson.

Reescrevendo a equação (A.30) para a iteração  $j$ , obtém-se a seguinte equação:

$$K_{ef}^{j-1} \theta_{t+\Delta t}^j = F_{ef}^{j-1} \quad (\text{A.34})$$

onde

$$\theta_{t+\Delta t}^j = \theta_{t+\Delta t}^{j-1} + \Delta\theta^j \quad (\text{A.35})$$

Substituindo (A.31), (A.32) e (A.35) em (A.34), obtém-se a seguinte expressão:

$$[C + \alpha\Delta tK]^{j-1}[\theta_{t+\Delta t}^{j-1} + \Delta\theta^j] = [C - \Delta t(1 - \alpha)K]_t\theta_t + \Delta t[(1 - \alpha)F_t + \alpha F_{t+\Delta t}^{j-1}] \quad (\text{A.36})$$

Efetuada algumas manipulações algébricas, a equação (A.36) pode ser reescrita na seguinte forma:

$$K_{ef}^{j-1}\Delta\theta^j = \Psi^{j-1} \quad (\text{A.37})$$

onde  $\Psi$  é o vetor de temperaturas residuais dado pela seguinte equação:

$$\Psi^{j-1} = F_{ef}^{j-1} - R^{j-1} \quad (\text{A.38})$$

em que,

$$k_{ef}^{j-1} = C_{t+\Delta t}^{j-1} + \alpha\Delta tK_{t+\Delta t}^{j-1} \quad (\text{A.39})$$

$$F_{ef}^{j-1} = [C_t - \Delta t(1 - \alpha)K_t]\theta_t + \Delta t[(1 - \alpha)F_t + \alpha F_{t+\Delta t}^{j-1}] \quad (\text{A.40})$$

$$R^{j-1} = K_{ef}^{j-1}\theta_{t+\Delta t}^{j-1} \quad (\text{A.41})$$

O processo iterativo atinge convergência quando a inequação seguinte é satisfeita.

$$\frac{\|\theta_{t+\Delta t}^j - \theta_{t+\Delta t}^{j-1}\|}{\|\theta_{t+\Delta t}^{j-1}\|} \leq TOL \quad (\text{A.42})$$

onde  $\|\cdot\|$  é a norma euclidiana e  $TOL$  é a tolerância exigida.